



Munich Personal RePEc Archive

Linking emissions trading systems and climate policy

Itkonen, Juha

Valtiovarainministeriö

April 2009

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/30171/>

MPRA Paper No. 30171, posted 15 May 2011 15:28 UTC



VALTIOVARAINMINISTERIÖ

Keskustelualoite 3/2009

Päästökauppajärjestelmien linkittämisen ilmastopoliittiset vaikutukset

Juha Itkonen

Kesäkuu 2009

* Haluaisin kiittää rahoitusmarkkinaosaston ilmastyhmää ja erityisesti Anne af Ursinia avusta ja ohjauksesta sekä prof. Poutvaaran tutkielmaseminaariryhmän jäseniä hyödyllisestä palautteesta.

** Valtiovarainministeriö, Snellmaninkatu 1 A, Helsinki, PL 28, 00023 VALTIONEUVOSTO, juha.itkonen@vm.fi

ISSN 1797-9714

ISBN 978-951-804-984-8

Päästökauppajärjestelmien linkittämisen ilmastopoliittiset vaikutukset

Kesäkuu 2009*

Juha Itkonen **

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tarkastellaan, millaisia taloudellisia vaikutuksia päästökauppajärjestelmien linkittymisellä on ilmastopoliittikkaan sekä kansainvälisellä että kansallisella tasolla. Ilmastopoliittikan tavoitteiden osalta tarkastellaan erityisesti kustannustehokkuutta, vaikutusten jakautumista eri toimijoiden välillä, kansallista kilpailukykyä ja päästötavoitteiden toteutumista. Lisäksi tarkastellaan, millaisia muutoksia linkittyminen aiheuttaa päästökauppajärjestelmien rakenteisiin ja päätöksenteon puitteisiin. Linkittymisen vaikutusten arvioimiseksi muodostetaan linkittymistä kuvaava osittaistasapainomalli, linkittymismalli, jonka avulla vaikutuksia voidaan eritellä. Osoittautuu, että annetuilla oletuksilla linkittämällä paikallisia järjestelmiä ja siirtymällä perinteisistä krediittijärjestelmistä ”no lose” -tavoitteisiin perustuviin krediittijärjestelmiin voidaan parantaa ilmastopoliittikan kustannustehokkuutta, vaikkakin hyödyt jakautuvat epätasaisesti esimerkiksi kilpailukyvyyn osalta. Linkittyminen edellyttää sitovaa sopimusta päästökatoista, sillä linkittyminen muuttaa kannustimia päästökaton asettamiselle.

Abstract

This study analyses how linking emissions trading systems affects the economical aspects of climate policy at both national and international levels. The analysis focuses on cost-efficiency, distribution between participants, competitiveness and emissions targets. In addition we examine how linking affects the structure of emissions trading systems and decision-making. To analyse specific effects, we formulate a partial-equilibrium model to depict linking. With given assumptions, cost-efficiency of climate policy can be improved by linking local emissions trading systems and by switching from conventional credit-based systems to systems with “no lose” -targets, however the benefits are unevenly distributed between participants, inter alia, due to effects on competitiveness. Linking necessitates an international agreement on emissions levels between parties as linking changes the incentives to set an emissions target.

Keywords: Climate Change, Climate policy, Emissions trading, Carbon Market, Linking, EU ETS, Kyoto Protocol JEL Codes: F18, Q52, Q54, Q58

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Linkittymisen lähtökohdat	10
2.1	Linkittyminen osana kansainvälistä ilmastopolitiikkaa	10
2.2	Päästökauppajärjestelmät	13
2.2.1	Kiintiöjärjestelmät	13
2.2.2	Krediittijärjestelmät	15
2.2.3	Sektorikohtaiset krediittijärjestelmät	17
2.3	Linkit	20
2.3.1	Suorat linkit	21
2.3.2	Epäsuorat linkit ja kaupanrajoitukset	22
2.4	Päästöyksiköiden korvaavuus	23
2.4.1	Taloudellinen ja juridinen korvaavuus	23
2.4.2	Päästöjen korvaavuus	24
3	Linkittymisen analyttinen tarkastelu	28
3.1	Aiemmat mallit	29
3.1.1	Rehdanz–Tol-malli	29
3.1.2	Angerin malli	36
3.2	Linkittymismalli	39
3.2.1	Talousyksikön kuvaus	41
3.2.2	Kiintiöjärjestelmän hiilimarkkinat	43
3.2.3	Aggregointi	46
3.2.4	Krediittijärjestelmät	48
3.2.5	Linkittyminen	51

3.2.6	Päästöoikeudet varallisuutena	52
3.2.7	Yhteys Rehdez–Tol-malliin	53
3.2.8	Esimerkki	55
4	Päästökauppajärjestelmien linkittämisen vaikutukset	56
4.1	Kustannustehokkuus	57
4.1.1	Linkittymättömät järjestelmät	57
4.1.2	Linkittyneet järjestelmät	59
4.1.3	Sosiaalinen optimi	61
4.1.4	Siirtyminen NL-järjestelmiin	62
4.1.5	Hinta- ja kokoero	67
4.1.6	Tehokkuus käytännössä	70
4.2	Distribuutio	71
4.2.1	Yksittäisen yrityksen tapaus	71
4.2.2	Päästökauppajärjestelmän tapaus ja pääomavirta . . .	72
4.2.3	Alkujaon ja päästökaton vaikutus distribuutioon . . .	73
4.3	Kilpailukyky	75
4.3.1	Kattavuus	77
4.3.2	Alkujako	77
4.4	Päästöt	79
4.4.1	Mittaus ja valvonta	80
4.4.2	Alkujako	81
4.4.3	Muita vaikutuksia	82
4.5	Rakenne	83
4.6	Päätöksenteko ja yhteensopivuus	85
4.6.1	Päätösvallan rajoittuminen	85
4.6.2	Päästökaton asettaminen	87
4.6.3	Linkin rajoittaminen	91
4.6.4	Kansainvälinen ilmastopöytäkirja ja linkittymisprosessi .	92
5	Johtopäätökset	96
A	Paikallisia yritystason kiintiöjärjestelmiä	99
A.1	Regional Greenhouse Gas Initiative	99

A.1.1	RGGI:n kiintiöjärjestelmä	99
A.1.2	Linkittyminen RGGI:n ja EU ETS:n välillä	101
A.2	Western Climate Initiative	103
A.2.1	WCI-järjestelmä	103
A.2.2	WCI:n ja EU ETS:n linkittäminen	104
A.3	Australia	105
A.3.1	CPRS-järjestelmä	105
A.3.2	CPRS:n ja EU ETS:n linkittäminen	107
A.4	Uusi-Seelanti	108
A.4.1	NZ ETS	108
A.4.2	NZ ETS:n linkittäminen	109
B	Todistuksia	112
C	Linkittymismallin merkinnät	114
	Lähteet	115

Luku 1

Johdanto

Voimassaoleva YK:n ilmastopimuksen Kioton pöytäkirja asettaa teollisuusmaille sitovat päästötavoitteet. Parhaillaan neuvotellaan uudesta ilmastopimuksesta, jonka on määrä astua voimaan Kioto-kauden jälkeen vuonna 2012. Uuden ilmastopimuksen sisällöstä on määrä päättää vuoden 2009 loppuun mennessä. On todennäköistä, että sopimus sisältää sitovia päästötavoitteita ja päästökauppaan perustuvia joustomekanismeja.

Päästövähennysten toimeenpanemiseksi on tarjolla monia talouspoliittisia instrumentteja, mutta päästökaupasta on muodostumassa keskeisin keino saavuttaa vaaditut päästötavoitteet. Paikalliset yritystason päästökauppajärjestelmät, kiintiöjärjestelmät, velvoittavat saastuttavia yrityksiä hankkimaan päästöilleen päästöoikeuksia. Toisaalta yksittäisiin päästövähennysprojekteihin perustuvat krediittijärjestelmät tarjoavat yrityksille vaihtoehtoisia tapoja vähentää päästöjä.

Useat teollisuusmaat ovat rakentaneet tai ovat rakentamassa tällaisia päästökauppajärjestelmiä. EU:n päästökauppajärjestelmä EU ETS on ensimmäinen ja suurin kasvihuonekaasuja rajoittava järjestelmä. Uusseelantilainen NZ ETS aloitti vuoden 2008 alussa, amerikkalainen alueellinen järjestelmä RGGI aloitti vuoden 2009 alussa ja WCI:n on määrä aloittaa vuonna 2012, australialaisen CPRS-järjestelmän on määrä aloittaa vuonna 2010, Japanissa on perustettu päästökauppajärjestelmä Tokion metropolialueelle ja kansallinen järjestelmä on suunnitteilla.

Paikallisten päästökauppajärjestelmien luomat hiilimarkkinat rajoittuvat

järjestelmän alueelle. Yhdessä järjestelmässä toimivalla yrityksellä ei ole syytä hankkia toisen järjestelmän päästöoikeuksia: ilman järjestelmän ylläpitäjän suostumusta yritys ei voi käyttää vieraita päästöoikeuksia suoriutuakseen päästökaupan velvoitteista. Näin myös päästöoikeuksien hinta poikkeaa eri järjestelmissä, mikä johtaa kustannustehottomuuteen: ilmaston kannalta sama vaikutus olisi mahdollista saavuttaa pienemmillä kustannuksilla.

Ongelma on mahdollista ratkaista linkittämällä päästökauppajärjestelmiä. Linkittäminen tarkoittaa, että päästökauppajärjestelmä sallii yritysten käyttää toisen järjestelmän päästöoikeuksia päästökaupan velvoitteista suoriutuakseen. Näin hiilimarkkinat yhdistyvät ja syntyy yhteinen hintasignaali, joka kohdentaa päästövähennykset sinne, missä päästöjen vähentämien on halvinta.

Linkittymisellä on myös monia muita vaikutuksia, jotka riippuvat pääasiassa linkittyvien järjestelmien ominaispiirteistä. Lopputuloksen arvioiminen on hankalaa mutta välttämätöntä. Ensinnäkin on todennäköistä, että uusi ilmastopimus tulee sisältämään useita rinnakkaisia päästökauppajärjestelmiä (Stern 2008). Monia markkinaehtoisia mekanismeja sisältävän ilmastopimuksen implikoima taakanjako ei ole läpinäkyvä, jos järjestelmien keskinäistä vuorovaikusta ei ymmärretä. Linkittymistä kuvaavat mallit tarjoavat tähän vastauksen. Toiseksi yritystason kiintiöjärjestelmien linkittäminen tarjoaa mahdollisuuden parantaa paikallisen ilmastopolitiikan kustannustehokkuutta, mutta tähän liittyy monia riskejä. Jos järjestelmät eivät ole rakenteellisesti yhteensopivia, linkittymisellä saattaa olla hyvinkin negatiivisia vaikutuksia.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan, millaisia taloudellisia vaikutuksia linkittymisellä on ilmastopolitiikkaan sekä kansainvälisellä että kansallisella tasolla. Ilmastopolitiikan tavoitteiden osalta tarkastellaan erityisesti kustannustehokkuutta, vaikutusten jakautumista eri toimijoiden välillä, kansallista kilpailukykyä ja päästötavoitteiden toteutumista. Lisäksi tarkastellaan, millaisia rakenteellisia muutoksia linkittyminen aiheuttaa, ja mitä se tarkoittaa päätöksenteon kannalta.

Linkittymisen arviointi perustuu ensisijaisesti teoreettiseen tarkasteluun. Tutkimuskysymyksen laaja-alaisuudesta johtuen on muodostettava aiempia

kattavampi linkittymistä kuvaava malli. Tässä muodostettava *linkittymismalli* on osittaistasapainomalli, jonka avulla voidaan kuvata aiempaa useampia linkittymiseen liittyviä ilmiöitä. Kuten aina linkittymismalli on yksinkertaistus todellisuudesta, joten on kiinnitettävä erityistä huomiota mallin puutteisiin. Siksi tarkastelu keskittyykin suurelta osin oletusten ulkopuolelle.

Englanninkielisessä akateemisessa kirjallisuudessa linkittymistä on käsitelty varsin vähän. Rehdanz ja Tol (2005) tarkastelevat pääasiassa linkittyneiden hiilimarkkinoiden kauppapoliittisia vaikutuskeinoja, mutta heidän esityksensä tarjoaa välineitä ja lähtökohtia myös aiheen syvempään analyttiseen tarkasteluun. Böhringer et al. (2005) sivuavat aihetta tarkastellessaan EU:n päästökauppajärjestelmää irrallisten kansallisten hiilimarkkinoiden kokonaisuutena. EU ETS ei kata kaikkia taloudessa syntyviä päästöjä ja jäsenmaat päättävät kansallisissa jakosuunnitelmissaan (national allocation plan, NAP), kuinka maat jakavat päästöoikeudet sektorien kesken. Tämä ongelma näyttäytyy teoreettisessa tarkastelussa hyvin samankaltaisena kuin linkittyminen. Anger (2008) näyttää hyödyntäneen tätä analyttistä lähtökohtaa tarkastellessaan, millaisia kustannusvaikutuksia syntyisi, jos EU ETS linkittäisiin muihin paikallisiin päästökauppajärjestelmiin. Tämän tutkielman disposition puitteissa Angerin tarkastelun painopiste rajautuu vain staattisiin kustannusvaikutuksiin.

Suomenkielistä kansantaloustieteellistä kirjallisuutta linkittymisestä ei löytynyt. Suomeksi linkittymistä on käsitelty pääasiassa EU ETS:n ja Kioto-mekanismeja yhdistäneen linkkidirektiivin (EU 2004) osalta, mutta näissä kysymyksenasettelu on hyvin erilainen.

Toisaalta linkittymistä on käsitelty varsin runsaasti englanninkielisissä asiantuntijaorganisaatioiden raporteissa (Flachslan et al. 2008; Jaffe ja Stavins 2007; Ellis ja Tirpak 2006; Haites ja Wang 2006; Blyth & Bosi 2004; Haites 2001). Näissä tyypillisesti teemaa tarkastellaan päätöksentekijän näkökulmasta ja varsin laaja-alaisesti. Keskeisen ongelman muodostaa se, miten erilaiset päästökauppajärjestelmien ominaispiirteet ja rakenteelliset elementit vaikuttavat linkittymisen seurauksiin. Tälle kirjallisuuden luokalle on luonteenomaista, että johtopäätöksiä ei perustella analyttisesti, joten argumentaatio ei ole läpinäkyvää. Mainittakoon, että Jaffe ja Stavins (2007) kuvaa-

vat suhteellisen yksityiskohtaisesti taloudellisten vaikutusmekanismien toimintaa, vaikka eivät tarjoa formaalia kehikkoa vaikutusten arvioinnille. Merkittävän panoksen aiheeseen on antanut Wuppertal-instituutin JET-SET-tutkimusprojekti (Joint Emission Trading as a Socio-Ecological Transformation) (Wuppertal 2004), jonka puitteissa on syntynyt runsaasti aineistoa myös linkittymisen taloudellisista vaikutuksista.

Lähempi tarkastelu osoittaa, että linkittymisen problematiikka muistuttaa monessa suhteessa päästökaupan yleistä analyysiä. Analyyttinen yhteys päästökaupan yleiseen teoriaan tarjoaa mahdollisuuksia hyödyntää päästökauppaa koskevaa kirjallisuutta.

Esimerkiksi päästökauppajärjestelmien linkittämisen kustannustehokkuusvaikutus voidaan osoittaa todistuksella, joka osin muistuttaa päästökaupan vähimmäiskustannusperiaatteen todistusta yksittäisessä järjestelmässä. Ronald Coasen (1960) hahmotteleman ajatuksen, että lupia ja oikeuksia tulisi arvioida tuotannontekijöinä, puki myöhemmin päästökaupan muotoon Crocker (1966, ref. Hanley et al. 2007, Tietenberg 2006) ja Dales (1968). Montgomery (1972) esitti päästökaupan tehokkuudesta todistuksen, johon nojaten voidaan myös osoittaa, että linkittyneiden päästökauppajärjestelmien verkosto on tehokas.

Toisaalta tarkastelun ulkopuolelle on syytä rajata monia teemoja, joita käsitellään päästökauppaa yleisesti koskevassa kirjallisuudessa. Koska useimmat päästökaupan ilmiöt, ongelmat ja ominaisuudet säilyvät linkittymisestä huolimatta, niiden käsitteleminen ei ole tarpeellista tässä yhteydessä. Tässä tutkielmassa rajaudutaan tarkastelemaan erityisesti linkittymisen aiheuttamia muutoksia päästökaupassa.

Myöhemmin esiteltävä *linkittymismalli* irtautuu päästökaupan teoriaperinteestä ja muotoilee linkittymisongelman siten, että päästökauppajärjestelmien erityispiirteiden huomioiminen on mahdollista. Tarkoituksena on kuvata päästökauppaa tavalla, joka mahdollistaa tekemään laajalti johtopäätöksiä nojaten mikrotalousteorian keskeisiin tuloksiin ja menetelmiin. Erityispiirteiden tiivis mutta laaja-alainen tarkastelu edellyttää, että linkittymisproblematiikka tuodaan lähelle neoklassista teoriarunkoa. Tässä tarkastelussa on tukeuduttu pitkälti Mas-Colellin, Whinstonin ja Greenin *Microeconomic The-*

ory -teokseen (1995).

Yksinkertaistaen voidaan todeta, että tämä tutkielma pyrkii pitkälti vastaamaan samaan kysymykseen kuin edellä mainitut asiantuntijaorganisaatioiden raportit, mutta käyttää tähän linkittymistä käsittelevien akateemisten mallien ja mikrotalousteorian tarjoamia välineitä.

Luvussa 2 esitellään linkittymisen problematiikkaa, sijoitetaan se osaksi laajempaa ilmastopoliittista keskustelua, ja määritellään käsitteitä ja lähtökohtia linkittymisen analyyttiselle tarkastelulle. Luvussa 3 esitellään Reh-danzin ja Tolin (2005) sekä Angerin (2008) mallit. Lisäksi määritellään linkittymismalli ja esitetään sen välittömiä ominaisuuksia. Luvussa 4 linkittymismallin avulla tarkastellaan linkittymisen vaikutuksia, jotka on jaoteltu tehokkuus-, distribuutio-, kilpailukyky-, päästö- ja rakennevaikutuksiin sekä poliittisiin seurauksiin. Luku 5 kerää yhteen johtopäätöksiä ja tarkastelee linkittymisproblematiikan kokonaisuutta. Liite A esittelee lyhyesti neljä paikallista yritystason päästökauppajärjestelmää ja tarkastelee EU:n päästökauppajärjestelmän linkittymismahdollisuuksia. Liite B esittää kaksi johtopäätösten kannalta tärkeitä todistusta. Liite C luettelee linkittymismallissa käytetyt merkinnät.

Luku 2

Linkittymisen lähtökohdat

2.1 Linkittyminen osana kansainvälistä ilmastopolitiikkaa

Päästökauppajärjestelmä on taloudellinen keino toteuttaa ilmastonmuutosta lieventävät toimenpiteet siellä, missä se on kustannustehokasta. Keinoina nämä järjestelmät ovat parhaimmillaan, kun niiden synnyttämät päästömarkkinat toimivat tehokkaasti. Kun päästömarkkinoita ajatellaan erityisesti rahoitusmarkkinoina, tätä tehokkuutta voidaan arvioida rahoitusmarkkinoiden yleisillä tehokkuuskriteereillä: markkinoiden tulisi allokovia yhteiskunnan resursseja tarkoituksenmukaisesti.

Keskeisin tavoite tehokkaiden päästömarkkinoiden luomiseksi on niiden laajentaminen. Markkinoiden laajentaminen lisää volyyymiä, likviditeettiä, vakautta ja ennustettavuutta sekä pienentää riskejä ja kustannuksia. Julkisen rahoituksen näkökulmasta linkittyminen on siis osa päästökaupan problematiikkaa: päästökauppa on keino kerätä ja kohdistaa yhteiskunnan resurssit tehokkaasti, linkittyminen on keino lisätä tätä tehokkuutta entisestään.

Taloustieteellinen ideaalitavoite olisi luoda globaalit päästömarkkinat, jotka määrittelisivät yhteisen hinnan yhteiselle haitakkeelle, kasvihuonekaasuille. Puolestaan ideaalinen keino saavuttaa tämä tavoite olisi luoda globaali yritystason päästökauppajärjestelmä (ks. Rehdanz ja Tol 2005). Tällainen globaali yritystason järjestelmä asettaisi globaalisti kaikille yrityksille yhtei-

set velvoitteet ja pelisäännöt, joita valvoisi kansainvälinen toimielin.

On kuitenkin hyvin epärealistista olettaa, että tällainen globaali yritystason päästökauppajärjestelmä syntyisi Post-Kioto-sopimuksen yhteydessä tai aivan lähitulevaisuudessa. Ensinnäkin neuvottelut globaalista yritystason järjestelmästä edellyttävät yhteisesti sovittuja, juridisesti sitovia päästövähennysvelvoitteita. Nykytilanteessa, kun kansainvälinen sopimus sitovista päästötavoitteista näyttää epävarmalta, ei ole syytä olettaa, että tämän lisäksi syntyisi globaali yritystason päästökauppajärjestelmä ainakaan lähitulevaisuudessa. Toiseksi, paikallisia erityisolosuhteita on hankala ottaa riittävän hyvin huomioon globaalissa järjestelmässä. Kolmanneksi, yritystason päästökauppajärjestelmät ovat hyvin monimutkaisia juridisia kokonaisuuksia, jotka vaikuttavat laajalti ja syvästi talouden rakenteisiin ja yhteiskunnan toimintaan. On oletettavaa, että kiireisellä aikataululla tällaisesta sopiminen on käytännössä mahdotonta. On siis tarkasteltava muita keinoja globaalien päästömarkkinoiden luomiseksi.

Kehitys näyttää etenevän kohti tilannetta, jossa syntyy paikallisia päästökauppajärjestelmiä, joita on jo perustettu ja joita on runsaasti suunnitella eri puolilla maailmaa. Koska paikalliset päästökauppajärjestelmät luovat *paikallisia* hiilimarkkinoita, ne voivat hyödyntää vain osan päästömarkkinoiden tarjoamista tehokkuuseduista. Seuraava kehitysaskel on näiden paikallisten järjestelmien linkittäminen. Linkittämällä paikallisia päästökauppajärjestelmiä linkitetään myös paikallisia päästömarkkinoita. Linkittämällä järjestelmiä toisiinsa voidaan laajentaa markkinoita ja saavuttaa merkittävä osa eduista, joita globaali päästökauppajärjestelmä pystyisi tarjoamaan.

Päästökaupasta pystytään keräämään varoja myös muiden rahoitusmekanismien tarpeisiin, nimittäin huutokauppaamalla päästöoikeuksia. Tämä onkin noussut keskeiseen asemaan kansainvälisen ilmastopimuksen rahoitusneuvotteluissa. Siksi on tärkeä selvittää ensinnä, miten huutokaupan käyttö vaikuttaa linkittymisen mahdollisuuksiin, ja toisaalta, missä määrin huutokauppatuloja on mahdollista kerätä linkittyneiden päästökauppajärjestelmien verkostossa.

Globaalin päästökauppajärjestelmän ja linkittyneiden paikallisten päästökauppajärjestelmien tehokkuusetua voidaan tarkastella myös toisenlaisesta

näkökulmasta: teoriassa paikalliset päästökauppajärjestelmät voisivat toimia tehokkaasti myös ilman linkittymistä, jos tietyt ehdot täyttyisivät. Ensinnäkin jokaisen järjestelmän ylläpitäjän tulisi tietää eri järjestelmissä tehtävien päästövähennysten rajakustannukset. Toiseksi järjestelmän ylläpitäjillä tulisi olla konsensus näistä kustannuksista ja jokaisen tulisi säätää ilmastopolitiikan tiukkuutta tämän mukaisesti. Kolmanneksi rajakustannusten muutoksia tulisi arvioida ja politiikkaa säätää jatkuvasti. Nämä ehdot takaisivat, että kaikissa järjestelmissä päästöoikeuksien hinta on sama ja päästövähennyksiä syntyisi riittävä määrä. On ilmeistä, että edellisten ehtojen täyttäminen on käytännössä mahdotonta ilman linkkiä. (Ks. myös Jaffe ja Stavins 2007, 17.) Kun järjestelmät linkitetään, markkinamekanismi huolehtii siitä, että nämä ehdot täyttyvät ja päästövähennykset tuotetaan tehokkaasti.

Linkittyminen on hyvin monimutkainen prosessi, koska päästökauppajärjestelmät, niiden luomat päästömarkkinat ja markkinoilla kaupattavat tuotteet ovat monimutkaisia ja koska päästökaupan vaikutukset eri toimijoille ovat moninaisia. Siksi on otettava huomioon monenlaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat linkittymiseen ja jotka muuttuvat linkittymisen seurauksena.

Onkin esitetty huoli siitä, että linkin aikaansaamiseksi on ratkottava samat ongelmat kuin globaalin päästökauppajärjestelmän aikaansaamiseksi. Toisin sanoen, jos päästökauppajärjestelmiä onnistutaan linkittämään, myös globaalin järjestelmän luomisen pitäisi onnistua. Kuitenkin globaali päästökauppajärjestelmien verkosto, joka koostuu linkittyneistä, paikallisista yritystason päästökauppajärjestelmistä sallii vaihtelua eräiden ominaisuuksien osalta. Linkittyminen antaa siis mahdollisuuden sopeuttaa yksittäiset päästökauppajärjestelmät paikallisiin olosuhteisiin. (Ks. Blyth & Bosi 2004, 5.) Ne päästökauppajärjestelmien ominaisuudet, joita tässä yhteydessä ei tarvitse käsitellä, tarjoavat pelitilaa paikallisille intresseille. Näin linkittymisprosessi näyttäytyy helpompana keinona realisoida toimivien ja tehokkaiden päästömarkkinoiden tarjoamat edut.

Toinen linkittymisprosessin ansio on sen nopeus. Ilmastomuutokseen lieventäminen on mahdollista toteuttaa edullisesti, jos toimenpiteisiin ryhdytään nopeasti. Globaalin yritystason päästökauppajärjestelmän rakentaminen vaatisi runsaasti aikaa. Luomalla paikallisia päästökauppajärjestelmiä

toimenpiteisiin voidaan ryhtyä nopeasti, ja kustannustehokkuutta voidaan parantaa vaiheittain linkittämällä uusia paikallisia järjestelmiä järjestelmäkokonaisuuteen.

2.2 Päästökauppajärjestelmät

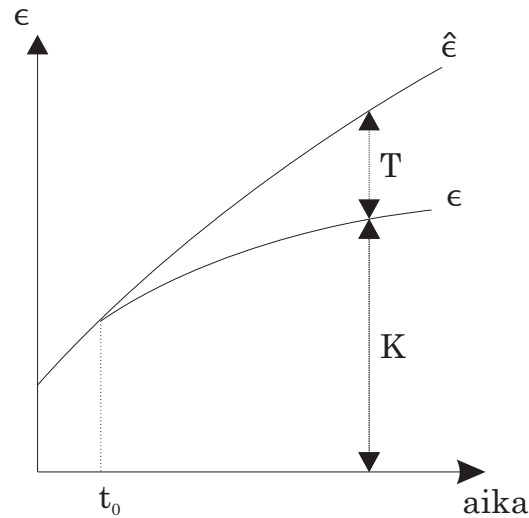
Päästökauppajärjestelmät ovat taloudellisia ja juridisia kokonaisuuksia, jotka säätelevät päästöjen tuottamista markkinaehtoisesti. Ne luovat päästöistä ja päästövähennyksistä kaupattavia arvopapereita, päästöyksiköitä. Päästökauppajärjestelmät muodostavat päästömarkkinoiden hallinnollisen perustan. Tässä tutkielmassa tarkastelu keskittyy erityisesti järjestelmiin, jotka pyrkivät lievittämään ilmastomuutosta vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä. Tällaisten päästökauppajärjestelmien synnyttämiä päästömarkkinoita kutsutaan usein hiilimarkkinoiksi (carbon markets).

Seuraavassa esitetään päästökauppajärjestelmien toimintaperiaatteita käytännöllisestä näkökulmasta. Esitys toimii lähtökohtana myöhemmälle analyttiselle tarkastelulle. Käytännöllisestä näkökulmasta päästökauppajärjestelmät voidaan jakaa kolmeen luokkaan: kiintiöjärjestelmiin, krediittijärjestelmiin ja ”no lose” -järjestelmiin.

2.2.1 Kiintiöjärjestelmät

Kiintiöjärjestelmät (ETS, emissions trading system, cap-and-trade, tradable pollution permits, emissions permit system) perustuvat kaupattaviin päästöoikeuksiin, joita myönnetään rajallinen määrä. (Ks. Kuva 2.1.) Järjestelmän kokonaispäästöille ϵ asetetaan yläraja eli päästökatto $K \geq \epsilon$, joka ositetaan päästöoikeuksiin. Päästöoikeudet ovat arvopapereita, jotka antavat järjestelmään kuuluville toimijoille oikeuden tuottaa tietty määrä päästöjä. Päästökauppakauden alkujankohdasta t_0 alkaen toimijat ovat velvoitettuja hankkimaan päästöjään vastaavan määrän päästöoikeuksia. Useimmissa ilmastomuutosta lievittämissä päästökauppajärjestelmissä yksi päästöoikeus antaa oikeuden tuottaa yhden hiilidioksidiekvivalenttitonnin kasvihuonekaasuja.

Kuva 2.1: Päästöt kiintiöjärjestelmässä



Kiintiöjärjestelmä määrittelee sen piiriin kuuluvat toimijat tai osallistujat, joita voivat olla esimerkiksi valtiot tai yritykset. Kannustimet, jotka kiintiöjärjestelmä luo, syntyvät nimenomaan järjestelmään osallistuville toimijoille. Esimerkiksi Kioton pöytäkirjassa määritelty päästökauppa koskee valtioita. Siinä luodaan globaali päästökatto, joka ositetaan AAU-päästöoikeuksiin¹. Kullekin jäsenmaalle jaetaan päästöoikeuksista osuus, joka on määritelty pöytäkirjan liitteessä. Lähtökohtaisesti päästöoikeuksia on vähemmän kuin arvioidaan, että päästöjä tuotettaisi luonnostaan \hat{e} . Päästöoikeudet ovat siis niukka resurssi. Käytännössä jäsenmailla on kaksi vaihtoehtoa reagoida päästöoikeuksien tarjonnan niukkuuteen. Valtio voi joko toteuttaa tarvittavat päästövähennykset T maansa alueella tai se voi ostaa lisää päästöoikeuksia muualta. Jos valtiolle jää ylimääräisiä päästöoikeuksia, se voi myydä ne muille.

On syytä korostaa, että tällainen valtioiden välinen järjestelmä ei itsessään kannusta yksityistä sektoria vähentämään päästöjä. Tässä tutkielmassa pääpaino on kansallisissa ja alueellisissa päästökauppajärjestelmissä, joissa yritykset ovat toimijoina. Nämä yritystason päästökauppajärjestelmät koh-

¹ Assigned Amount Unit.

dentavat yksityisten toimijoiden resursseja päästövähennyksiin.

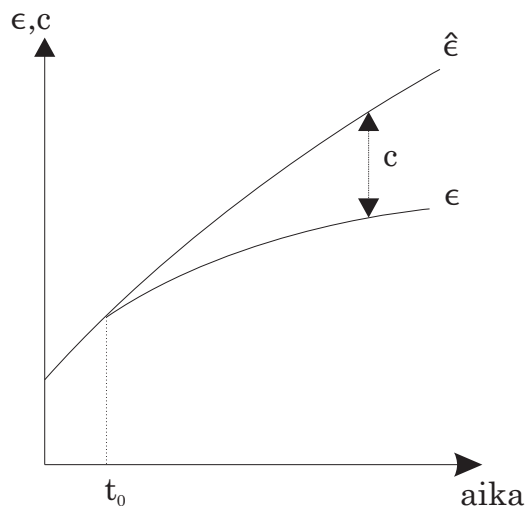
Yritystason päästökauppajärjestelmässä toimijoiden vaihtoehdot ovat samankaltaiset: Yritys voi itse tuottaa päästövähennyksiä tarvittavan määrän tai se voi ostaa lisää päästöoikeuksia toisilta yrityksiltä. Toisaalta voittoa maksimoiva yritys tuottaa päästövähennyksiä yli tarpeittensa ja myy ylimääräiset päästöoikeudet, jos se on taloudellisesti kannattavaa.

Liitteessä A on esitelty neljä paikallista yritystason kiintiöjärjestelmää.

2.2.2 Krediittijärjestelmät

Krediittijärjestelmät (credit system, project-based mechanism, baseline-and-credit) perustuvat kaupattaviin krediitteihin, joita myönnetään projektikohtaisesti todennettavista päästövähennyksistä. (Ks. kuva 2.2.) Krediittejä myönnetään määrä c , joka vastaa projektin aikaan saamaa vähennystä päästöissä eli $c = \hat{e} - e$, jossa \hat{e} on päästömäärä, joka olisi tuotettu ilman krediittijärjestelmää. Tyypillisesti krediitit saavat markkina-arvonsa siitä, että krediittejä on mahdollista käyttää kiintiöjärjestelmässä tai ne voidaan vaihtaa rahaan.

Kuva 2.2: Päästöt ja krediitit krediittijärjestelmässä



Esimerkiksi Kioton pöytäkirjan määrittelemät CDM- ja JI-järjestelmät²

² Clean Development Mechanism ja Joint Implementation.

ovat krediittijärjestelmiä. Teollisuusmaat voivat käyttää näiden järjestelmien CER- ja ERU-krediittejä³ suoriutuakseen Kioton pöytäkirjan päästövelvoitteista.

Teknisessä tarkastelussa krediittijärjestelmät näyttäytyvät eräänlaisena kiintiöjärjestelmien osajoukkona. Krediittijärjestelmän voi siis määritellä kiintiöjärjestelmänä, joka ensinnäkin on toimijoille vapaaehtoinen. Toiseksi se perustuu yksittäisiin projekteihin. Kolmanneksi krediittijärjestelmän päästötavoite – tässä yhteydessä baseline-skenaario tai BAU-skenaario⁴ – määritetään tapauskohtaisesti. Ja neljänneksi järjestelmän krediitit on tarkoitettu käytettäväksi muissa järjestelmissä. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 5.)

Osallistumisen vapaaehtoisuudesta seuraa, että krediittijärjestelmä ei luo kannustimia krediittien ostamiselle. Se ei siis luo hiilimarkkinoille kysyntää. Tyypillisesti kysyntä syntyy, kun krediittijärjestelmä linkitetään kiintiöjärjestelmään. Tätä käsitellään myöhemmin. Sen sijaan krediittijärjestelmä luo hiilimarkkinoille uuden päästöyksiköiden tarjonnan lähteen. Vapaaehtoisuudesta seuraa, että yritys osallistuu krediittijärjestelmään ja tuottaa päästövähennyksiä vain, jos sen arvioidaan olevan taloudellisesti kannattavaa.

Projektikohtainen BAU-skenaario on krediittijärjestelmän keskeisin ja ongelmallisin tekijä. BAU-skenaario luo päästöille kontrafaktuaalisen kehitysuran: BAU-skenaario arvioi, miten päästöt olisivat kehittyneet, jos projektia ei olisi rahoitettu krediiteillä. Jos projekti tuotetaan, BAU-skenaarion todennukaisuutta ei pystytä arvioimaan. Virheellisen BAU-skenaario seurauksena krediittejä myönnetään joko liikaa tai liian vähän, mikä heikentää tehokkuutta.

On syytä korostaa, että tässä käytetyt kiintiö- ja krediittijärjestelmien käsitteet ovat monessa suhteessa todellisuuden yksinkertaistuksia, eikä näistä lähtökohdista tavoiteta kaikkia päästökauppajärjestelmien ominaisuuksia tai eroavaisuuksia. Käsitteet kuitenkin helpottavat huomattavasti linkittymisen problematiikan haltuunottoa.

Eräät päästökauppajärjestelmät (esimerkiksi Albertan järjestelmä) toimivat siten, että ne asettavat järjestelmän piiriin kuuluville yrityksille päästö-

³ Certified Emission Reduction ja Emission Reduction Unit.

⁴ Business As Usual.

tavoitteet: yrityksen tulee suorittaa tietty määrä todennettavia päästövähennyksiä $T = \hat{e} - K$. Suorittamalla päästövähennysprojektin yritys voi ansaita kaupattavia krediittejä, jotka toimivat osoituksena päästövähennyksistä. Vaikka päästökauppajärjestelmän sisäisessä käsitteistössä puhutaankin krediiteistä, teknisessä katsannossa kyse on kiintiöjärjestelmästä, jossa mitataan päästöjen sijasta päästövähennyksiä T . Koska tällaiset päästökauppajärjestelmät eivät poikkea taloudellisten vaikutustensa osalta, ei niitä ole syytä erotella myöskään käsitteellisesti.

2.2.3 Sektorikohtaiset krediittijärjestelmät

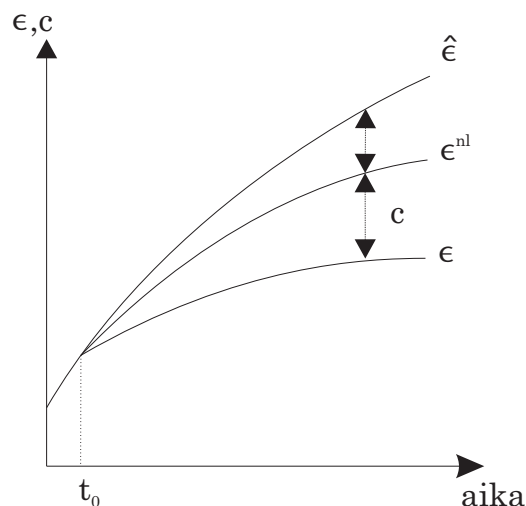
Päästökauppadiskurssin yhteydessä on puhuttu runsaasti sektorikohtaisista lähestymistavoista (sectoral approach, sector-based approach, sector-specific actions). Keskustelu lähestymistavan tiimoilta on hyvin hajanaista, mutta siitä on erotettavissa eräs juonne, joka on erityisen merkityksellinen linkittymisen kannalta. (Ks. Egenhofer ja Fujiwara 2008.) On ehdotettu uudenlaisia krediittijärjestelmiä, jotka perustuvat niin sanottuihin sektorikohtaisiin ”no lose” -tavoitteisiin⁵. Tavoitteena lienee ilmastoneuvotteluiden jouduttaminen ja nopeasti kehittyvien maiden (kuten Kiinan ja Intian) mukaan saaminen kansainväliseen sopimuskehikkoon.

Vuonna 2006 Center for Clean Air Policy (CCAP) julkaisi aiheesta suhteellisen konkreettisen esityksen asiakirjassaan *Sector-based Approach to the Post-2012 Climate Change Policy Architecture*. Ehdotuksessa vapaaehtoiset päästötavoitteet ϵ^{nl} määritetään sektoreittain: Jokainen annettulla sektorin toimiva yritys saa samankaltaisen päästötavoitteen. (CCAP 2006.) Esimerkiksi jokaiselle sementtisektorin yrityksille voidaan asettaa 90 % päästötavoitteen suhteessa sektorin BAU-skenaarioiden keskiarvoon. Jos yritys alittaa päästötavoitteen eli $\epsilon < \epsilon^{nl}$, niin yritys palkitaan krediiteillä c . Jos päästötavoite ylittyy, yritykselle ei aiheudu seurauksia. (CCAP 2006.) Sittenkin keskustelu sektorikohtaisista ”no lose” -tavoitteista on kehittynyt huomatta-

⁵ Terminä ”no lose” (ei tappiota) on ehkä huonosti valittu, sillä myöskään perinteiset krediittijärjestelmät eivät aiheuta tappioita yrityksille. Termillä on ilmeisesti haluttu rinnastaa NL-järjestelmä kiintiöjärjestelmään ja juridisesti sitoviin päästövähennystavoitteisiin.

vasti (ks. esim. Stern 2008).

Kuva 2.3: Päästöt ja krediitit NL-järjestelmässä



Linkittymisen näkökulmasta, CCAP:n ehdotuksen pohjalta voidaan muodostaa malli, ”no lose” -järjestelmä (NL), jonka avulla politiikkaehdotuksen vaikutuksia voidaan tarkastella linkittymistilanteissa. Malli soveltuu myös uudenpien ”no lose” -ehdotusten arviointiin. Analyttisesti tarkasteltuna NL-järjestelmä toimii kuten krediittijärjestelmä (ks. Kuva 2.3). Erona on se, että krediittien myöntämisen vertailukohtana ei käytetä projektikohtaista BAU-skenaariota vaan erityistä ”no lose” -tavoitetta, joka määritetään sektorikohtaisesti. Aivan kuten muissakin krediittijärjestelmissä yritystä ei rangaista, jos sen päästöt eivät alita NL-tavoitteita: yritykseltä jää vain krediitit saamatta.

Oletettavasti tällainen NL-krediitti tai ERC⁶ saisi arvonsa siitä, että krediitti voidaan käyttää veloitteiden täyttämiseksi kiintiöjärjestelmässä, esimerkiksi EU ETS:ssä tai Post-Kioto-ilmastosopimuksen päästötavoitteissa.

Krediittijärjestelmän ja NL-järjestelmän eroa voidaan havainnollistaa myös seuraavasti: Jos NL-tavoitteen käyrää (Kuva 2.3) nostaa ylemmäs eli tavoitetta löysätään, NL-järjestelmä alkaa muistuttaa enemmän perinteistä kre-

⁶ ERC eli Emission Reduction Credit on CCAP:n käyttämä termi.

diittijärjestelmää. Jos NL-tavoite nostetaan yhtä suureksi kuin BAU-käyrä, NL-järjestelmä on mallin puitteissa perinteinen krediittijärjestelmä.

Jos puolestaan NL-tavoitteen käyrää lasketaan eli tavoitetta tiukennetaan, niin kohdemaan yrityksen omakustannusosuus kasvaa. Rahoittajamaat, kuten Kioton pöytäkirjan liitteen B maat, maksavat aiempaa pienemmän osuuden tuotetuista päästövähennyksistä. Mutta jos tavoitetta tiukennetaan liikaa, päästöjen vähentäminen on yrityksen näkökulmasta taloudellisesti kannattamatonta.

Kansainvälisen taakanjaon ja rahoituksen näkökulmasta NL-järjestelmä asettuu kiintiöjärjestelmien ja krediittijärjestelmien välimaastoon. Karkeasti ajatellen kiintiöjärjestelmässä päästövähennyksistä aiheutuvat kustannukset kohdistuvat päästökauppaan osallistuville yrityksille. Puolestaan krediittijärjestelmässä kustannukset koituvat kiintiöjärjestelmälle, joka hyväksyy krediitit. Sen sijaan NL-järjestelmässä kustannukset jakautuvat NL-järjestelmän ja kiintiöjärjestelmän yritysten kesken: NL-järjestelmän yritys kattaa kustannukset, jotka aiheutuvat BAU-skenaarion ja NL-tavoitteen väliin jäävien päästöjen vähenemisestä; puolestaan ulkopuolinen kiintiöjärjestelmä kattaa kustannukset, jotka aiheutuvat NL-tavoitteen ylittävistä päästövähennyksistä. Verrattuna perinteisiin krediittijärjestelmiin NL-järjestelmässä päästövähennysten rahoitukseen osallistuvat myös kohdemaan yritykset – tosin sillä ehdolla, että yritykset jäävät voitolle.

NL-tavoitteiden keskeisenä etuna on se, että niiden avulla on mahdollista kasvattaa krediittijärjestelmiin perustuvan rahoituksen mittakaavaa. Ensinnäkin päästövähennysten kohdema osallistuu osaltaan päästövähennysten kustannuksiin: teollisuusmaan näkökulmasta yhden hiilidioksidiekvivalentitonnin nimellisarvoisen NL-krediitin tuottaminen edellyttää kohdemaalta useamman tonnin päästövähennystä.⁷ Koska krediittien käyttöä on usein rajoitettu, voitaisiin NL-järjestelmään siirtymisellä tuottaa aiempaa suurempi määrä päästövähennyksiä. Tämä osoitetaan analyttisesti alaluvassa 4.1.4.

Toisaalta NL-tavoitteet perustuvat sektorikohtaisiin tehokkuustavoitteisiin tai ns. teknologia benchmarkeihin. Tämä tarkoittaa, että BAU-skenarioita ei tarvitse laatia erikseen jokaista projektia varten, mikä keventää jär-

⁷ Katso alaluku 2.4.2.3.

jestelmään liittyvää byrokratiaa huomattavasti (ks. Stern 2008). Kolmanneksi BAU-skenaarion (jota ei siis käytännössä tarvitse arvioida) ja NL-tavoitteen väliin jäävä alue muodostaa eräänlaisen puskurin virhearvioiden varalta: Vaikka päästövähennyspotentiaali arvioidaan hieman väärin, on epätodennäköistä, että krediittejä myönnettäisiin toimenpiteistä, jotka olisivat toteutuneet järjestelmästä huolimatta. Siksi NL-järjestelmä vähentää perusteettomasti myönnettyjä krediittejä, jotka ovat poliittisesti hankalia.

2.3 Linkit

Linkki yhdistää päästökauppajärjestelmiä toisiinsa ja luo järjestelmille yhteiset päästömarkkinat. Linkittymisen lähtökohtana on tilanne, jossa päästökauppajärjestelmät eivät hyväksy toistensa päästöoikeuksia tai krediittejä.

On syytä huomata, että ilman linkkiä eri järjestelmissä toimivien yritysten välillä ei synny kauppaa päästöoikeuksista. Kaupankäynti eri järjestelmissä toimivien yritysten välillä edellyttää kiintiöjärjestelmän ylläpitäjän päätöstä. Ilman linkkiä järjestelmässä A toimivalla yrityksellä a ei ole kannustimia ostaa järjestelmässä B toimivan yrityksen b myymää päästöoikeutta, koska se ei voi käyttää sitä järjestelmässä A , jos järjestelmän A ylläpitäjä hyväksyy vain järjestelmän omat päästöoikeudet.

Ilman linkkiä päästökauppa aiheuttaa useimmille yrityksille suuremmat kustannukset. Esimerkkinä voidaan tarkastella monikansallista yritystä, jolla on tuotantolaitos kahdessa päästökauppajärjestelmässä. Ilman linkkiä yrityksen on hankittava kummallekin tuotantolaitokselleen järjestelmiensä mukaiset päästöoikeudet. Oletetaan, että ensimmäisessä järjestelmässä päästöoikeudet ovat halpoja, koska päästöjen vähentäminen on halpaa. Puolestaan toisessa järjestelmässä päästöoikeudet ovat kalliita, koska päästöjen vähentäminen on kallista. Yritys voi joko ostaa päästöoikeuksia tai investoida päästövähennyksiin. Jos yritys ostaa päästöoikeudet, sen on hankittava sekä kalliimpia että halvempia päästöoikeuksia. Jos taas yritys investoi päästövähennyksiin, sen on tehtävä myös kalliita investointeja, vaikka halvempiakin olisi tarjolla. Yritys voi siis hyödyntää vain osan halvoista päästövähennysmahdollisuuksistaan. Linkin avulla yritys voisi keskittää päästövähennykset

halvempaan järjestelmään ja tuottaa ilmaston kannalta samansuuruisen vaikutuksen halvemmalla hinnalla.

Lisäksi edellisen esimerkin myötä käy ilmeiseksi, että linkin tehokkuus perustuu samoihin taloustieteellisiin periaatteisiin kuin päästökauppa yleisesti: linkki mahdollistaa päästövähennysten tuottamisen siellä, missä se on halvin. Tämän ohessa markkinoiden laajentuminen lisää kilpailua ja heikentää yritysten monopolivoimaa.

Linkit voidaan luokitella vuorovaikutuksen luonteen ja vaikutusten perusteella suoriin ja epäsuoriin linkkeihin sekä yksi-, kaksi- ja monisuuntaisiin linkkeihin. Linkkeihin voidaan liittää rajoituksia, jotka vaikuttavat linkittymisen seurauksiin.

2.3.1 Suorat linkit

Suoralla yksisuuntaisella linkillä (direct one-way link, direct unilateral link) tarkoitetaan tilannetta, jossa yksi päästökauppajärjestelmä hyväksyy toisen järjestelmän päästöoikeuden tai krediitin omiinsa verrannollisina. Yksisuuntainen linkki syntyy, kun järjestelmän *A* yrityksen sallitaan käyttää järjestelmän *B* päästöoikeuksia suoriutuakseen päästökaupan velvoitteista, mutta järjestelmän *B* yritys ei voi toimia vastaavasti. Kyse on siis yksipuolisesta päätöksestä, että päästökauppajärjestelmän yritykset voivat käyttää toisen järjestelmän päästöyksiköitä.

Käytännön esimerkkinä Chicago Climate Exchange (CCE) hyväksyy Euroopan päästökauppajärjestelmä EU ETS:n EUA-päästöoikeudet. Kuitenkaan eurooppalaiset yritykset eivät voi käyttää CCE:n päästöoikeuksia päästövelvoitteidensa täyttämiseksi.

Tyypillinen yksisuuntainen linkki esiintyy krediitti- ja kiintiöjärjestelmän välillä: kiintiöjärjestelmän päästöoikeus voidaan korvata krediittijärjestelmässä tuotetulla krediitillä. Esimerkki tällaisesta linkistä löytyy EU ETS:n ja Kioton pöytäkirjan määrittelemän CDM-järjestelmän väliltä, tosin CDM:n krediittien käyttöön liittyy rajoituksia. Linkki on perustettu niin kutsutulla linkittymisdirektiivillä (EU 2004).

Suora kaksisuuntainen (two-way, bilateral) ja monisuuntainen (multilate-

ral) linkki viittaa päästökauppajärjestelmienväliseen sopimukseen, jossa järjestelmät päättävät hyväksyä toistensa päästöoikeudet.

Tällaisia linkkejä voi syntyä pääasiassa kiintiöjärjestelmien välille. Esimerkiksi Norjan päästökauppajärjestelmä on linkittynyt EU ETS:n kanssa, jolloin norjalainen yritys voi käyttää EUA-päästöoikeuksia. Vastaavasti EU:n päästökauppajärjestelmään osallistuvat yritykset voivat hyödyntää Norjan liikkeelle laskemia päästöoikeuksia.

2.3.2 Epäsuorat linkit ja kaupanrajoitukset

Epäsuoria linkkejä syntyy, kun järjestelmien välinen vuorovaikutus vaikuttaa kolmannen päästökauppajärjestelmän muodostaman hiilimarkkinan kysyntään ja tarjontaan, vaikka varsinaista suoraa linkkiä ei olisikaan. Esimerkiksi, jos järjestelmien A ja B välillä on suora kaksisuuntainen linkki ja järjestelmien B ja C välillä on suora kaksisuuntainen linkki, niin myös järjestelmien A ja C välille muodostuu epäsuora kaksisuuntainen linkki.

Suoriin linkkeihin voidaan luoda erilaisia rajoituksia. Toisen päästökauppajärjestelmän päästöoikeuksien ja krediittien käytön määrää voidaan rajoittaa tai niiden käytöstä voidaan periä lisämaksu. Tyypillisesti yritys voi käyttää toisen päästökauppajärjestelmän päästöoikeuksia tai krediittejä korkeintaan tietyn osuuden. Esimerkiksi EU ETS:n toisella kierroksella CDM-järjestelmässä tuotettuja CER-krediittejä saa käyttää korkeintaan kansallisissa jakosuunnitelmissa (national allocation plan, NAP) määritellyn prosenttiosuuden verran (EU 2004). Rajoituksilla on ilmeisesti haluttu hillitä linkin aiheuttamaa pääomavirtaa EU-alueilta kehitysmaihin ja tukea päästövähennysten tuotantoa EU-alueella.

Epäsuoriin linkkeihin sisältyy eräänlainen luontainen kaupanrajoitus: Kolmannen järjestelmän arvopapereita siirtyy linkin yli korkeintaan välissä olevan järjestelmän päästökaton verran. Esimerkkinä voidaan tarkastella tapusta, jossa suuri kiintiöjärjestelmä A linkittyy pieneen kiintiöjärjestelmään B , joka on aiemmin linkittynyt toiseen suureen järjestelmään C . Nyt siis A linkittyy C :hen epäsuorasti. Jos päästöoikeuksien hinta on A :ssa pienempi kuin B :ssä ja C :ssä, päästöoikeudet siirtyvät A :sta B :hen ja C :hen. Koska

C ei suoraan kelpuuta A :n päästöoikeuksia, A :n päästöoikeudet vaihdetaan ensin B :n päästöoikeuksiin. Jos järjestelmä B on pieni, sen päästöoikeuksien tarjonta saattaa tyrehtyä, ennen kuin hintaero on tasaantunut. Kaikki B :n päästöoikeudet siirtyvät siis järjestelmän C :n yrityksille. Näin epäsuora linkki A :n ja C :n välillä lakkaa vaikuttamasta. Lopulta järjestelmien A ja B yritykset maksavat samaa halvempaa hintaa päästöoikeuksistaan, kun taas C :n yritykset maksavat päästöoikeuksistaan enemmän.

2.4 Päästöyksiköiden korvaavuus

2.4.1 Taloudellinen ja juridinen korvaavuus

Kuten aiemmin todettiin, ilman linkkejä eri päästökauppajärjestelmien luomat päästömarkkinat ovat erillään toisistaan. Yrityksillä ei ole käyttöä toisen järjestelmän päästöoikeuksille. Toisin sanoen päästöyksiköitä (eli päästöoikeuksia tai krediittejä) ei voi korvata toisen järjestelmän päästöyksiköillä. Vasta linkittymisen seurauksena päästöyksikkö voidaan korvata toisen järjestelmän päästöyksiköllä. Korvaavuuden (fungibility) käsite on hyvä erottaa likviditeetin käsitteestä: ilman linkkiäkin päästöyksiköt voivat olla likvidejä, eli ne voidaan helposti muuntaa rahaksi. Mutta jos eri päästöyksiköitä ajatellaan hyödykkeinä, niin huomataan, etteivät ne vastaa samaan tarpeeseen eivätkä ne siksi korvaa toisiaan.

Kiotoon pöytäkirjan määrittelemät päästöyksiköt eli niin kutsutut Kioto-yksiköt (AAU, CER, ERU ja RMU⁸) ovat toisiinsa verrannollisia ja yhdenveroisia Kiotoon päästökauppajärjestelmässä. Lisäksi EU ETS:n toisen vaiheen EUA-päästöoikeudet kirjataan Kiotoon pöytäkirjan määrittelemään rekisterijärjestelmään ja niitä voidaan käyttää päästövelvoitteiden täyttämiseksi. EUA-päästöoikeus on siis yhdenveroinen Kioto-yksikkö. Lähtökohtaisesti valtiot voivat valita, missä määrin ne käyttävät näitä Kioto-yksiköitä täyttääkseen pöytäkirjan määrittelemät velvoitteensa. Kioto-yksiköt ovat siis

⁸ Assigned Amount Unit, Certified Emission Reduction, Emission Reduction Unit, Removal Unit.

keskenään korvaavia.⁹

Linkittymisdirektiivin (EU 2004) myötä EU ETS:n yritykset voivat korvata osan EUA-päästöoikeuksistaan CER ja ERU-krediiteillä. EU ETS:n ja CDM välisen linkin yksisuuntaisuus seuraa siitä, ettei päästöoikeuksille löydy merkityksellistä käyttötapaa krediittijärjestelmässä. Puolestaan Kiotovelvoitteiden täyttämiseksi (Kioton pöytäkirjan määrittelemässä cap-and-trade-järjestelmässä) voidaan käyttää EU ETS:n toisen vaiheen EUA-päästöoikeuksia muiden Kioto-yksikköjen ohessa. (Ks. UNFCCC 2009.)

2.4.2 Päästöjen korvaavuus

2.4.2.1 Päästöoikeuksien korvaavuus

Korvaavuutta voi tarkastella myös päästöjen näkökulmasta ja kysyä, edustavatko eri päästöyksiköt samansuuruista todellisuudessa tuotettua päästömäärää? Vaatiiko tietyn tyyppinen tuotanto eri määrän päästöoikeuksia eri päästökauppajärjestelmissä?

Käytännön tasolla jokaisen päästökauppajärjestelmän piiriin kuuluva tuotantolaitoksen on tarkkailtava tuottamiensa päästöjen määrää ja laadittava päästöistään selvitys. Tämän päästöselvityksen ”luotettavuus, uskottavuus ja tarkkuus sekä ilmoitetut päästöluvut ja -tiedot” on todennettava kolmannen osapuolen toimesta (sit. Energiamarkkinavirasto 2009). Nämä mittaus-, raportointi- ja todentamistoimenpiteet (MRV¹⁰) määrittävät sen, kuinka paljon yritys tarvitsee päästöoikeuksia. Koska nämä toimenpiteet ovat erilaisia eri järjestelmissä, on mahdollista, että samanlainen tuotantolaitos tarvitsee eri määrän päästöyksiköitä eri päästökauppajärjestelmissä. Voikin sanoa, että vaikka eri järjestelmien päästöoikeuksien nimellinen arvo on samansuuruinen, niiden reaalin ympäristöarvo voi olla erisuuruinen.

Jos oletetaan, että mittaus-, raportointi- ja todentamistoimenpiteet ovat suurin piirtein samankaltaiset, voidaan tarkastelun lähtökohtana pitää sitä, että päästöyksiköt ovat päästöjen suhteen korvaavia. Tämä tarkoittaa, että jos päästöoikeus myydään ja käytetään toisessa järjestelmässä, ensimmäises-

⁹ Kioto-yksiköiden käyttöön liittyy eräitä rajoituksia.

¹⁰ Monitoring, reporting and verification.

sä järjestelmässä syntyy päästöoikeuden verran vähemmän päästöjä. Toisin sanoen yhden järjestelmän lisäpäästöt korvautuvat toisen järjestelmän päästövähennyksillä, joten linkittymien ei lähtökohtaisesti vaikuta toteutuneisiin kokonaispäästöihin.

2.4.2.2 Päästöoikeuksien ja krediittien korvaavuus

Päästöyksiköiden vertailu on erityisen ongelmallista, kun tarkastellaan päästöoikeuksien ja krediittien välistä korvaavuutta. Toisin kuin päästöoikeudet, päästövähennysprojekteista saadut krediitit edustavat päästöjä, jotka jäävät syntymättä projektin rahoittamisen seurauksena. Krediittien myöntäminen edellyttää päästöjen mittaamisen, raportoinnin ja todentamisen lisäksi niin kutsuttua BAU-skenaariota¹¹. BAU-skenaario kertoo, miten päästöjen odotetaan kehittyvän ilman päästövähennysprojektia.

Krediittejä myönnetään määrä, joka vastaa BAU-skenaarion ja mitattujen päästöjen välistä erotusta (ks. Kuva 2.2). Päästövähennysprojekti muuttaa kehitystä siten, että päästöjä tuotetaan normaalia vähemmän. Näiden käyrien väliin jäävä alue on yhtä suuri kuin projektista saatujen krediittien määrä. Ideaalitulanteessa tämän pitäisi olla yhtä suuri kuin projektin todellisuudessa aiheuttamien päästövähennysten määrä.

Toisin muotoiltuna, nimellisesti samanarvoisen päästöoikeuden ja krediitin reaalin arvo riippuu mittaus-, raportointi- ja todentamistoimenpiteiden lisäksi BAU-skenaarion valinnasta. Virheellinen BAU-skenaario saattaa joko lisätä tai vähentää päästöjä. Jos BAU-skenaario asetetaan liian korkealle, krediittejä myönnetään päästöistä, joita ei todellisuudessa olisi edes syntynyt, jolloin krediittien käyttö lisää päästöjä. Jos BAU-skenaario asetetaan liian alas, osa päästövähennyksistä jää palkitsematta. Silloin yhden krediitin tuottamiseksi joudutaan vähentämään yli tonnin verran päästöjä, mutta krediitin käyttäminen kiintiöjärjestelmässä lisää päästöjä vain yhden tonnin, joten krediittien käyttö vähentää päästöjä.

Lähtökohdaksi voidaan olettaa, että päästöyksiköt ja krediitit ovat päästöjen suhteen korvaavia, kunhan mittaus-, raportointi- ja todentamistoimen-

¹¹ Business as Usual.

piteet ovat suurin piirtein samankaltaiset ja BAU-skenaario on keskimäärin kohdallaan. Tällöin krediittien käyttö kiintiöjärjestelmässä ei lisää eikä vähennä päästöjä.

2.4.2.3 ”No lose” -krediittien korvaavuus

Korvaavuus mutkistuu entisestään ”no lose” -järjestelmässä tuotettujen krediittien tapauksessa. ”No lose” -krediittejä ei myönnetä jokaisesta vähennetystä hiilidioksiditonista; niitä myönnetään vain ”no lose” -tavoitteen ylittävältä osalta. Siksi yhden hiilidioksiditonin arvoisen NL-krediitin tuottamiseksi on tuotettava useamman hiilidioksiditonin edestä päästövähennyksiä. Krediitti edustaa siis nimellisarvoaan suurempaa päästövähennysten määrää. Toisin sanoen krediitin reaalin ympäristöarvo on suurempi kuin sen nimellinen arvo.

Käytännössä tämä tarkoittaa, että kun NL-krediitti käytetään kiintiöjärjestelmässä, niin kokonaispäästöt vähenevät: Kun yksi krediitti käytetään kiintiöjärjestelmässä, voidaan tuottaa yksi tonni enemmän päästöjä. Tämän vastapainona NL-krediitin tuottamiseksi on jouduttu tekemään enemmän kuin yhden tonnin verran päästövähennyksiä.

Tämän lisäksi NL-krediitin nimellisen ja reaalin arvon suhde vaihtelee. Tätä voidaan havainnollistaa numeerisella esimerkillä. Olkoon yrityksen NL-tavoitteena vähentää yhden tonnin verran hiilidioksidipäästöjään. Jos yritys vähentää päästöjään kaksi tonnia, se saa tavoitteen ylittävästä tonnista yhden krediitin. Tämä krediitti edustaa kahden tonnin päästövähennystä. Taas jos yritys vähentää päästöjään kolmella tonnilla, niin se saa kaksi krediittiä. Nämä krediitit edustavat yhteensä kolmen tonnin päästövähennystä, puoli toista tonnia kumpikin. Ensimmäisessä tapauksessa reaalin ja nimellisen arvon suhdeluku on 2 ja jälkimmäisessä tapauksessa se on 1,5.

On mahdollista, että erot NL-krediittien reaaliarvoissa johtavat markkinoiden osittaiseen differoitumiseen. Koska krediitit vaihtelevat ympäristövaikutustensa suhteen, eräät markkinatoimijat saattavat suosia korkean reaaliarvon NL-krediittejä. On kuitenkin syytä muistaa, että taloudellinen motiivi krediittien ostamiselle syntyy siitä, että yritykset ja valtiot voivat hyödyntää

niitä suoriutuakseen päästökaupan velvoitteista. Tässä suhteessa ainoastaan
krediitin nimellisellä arvolla on merkitystä.

Luku 3

Linkittymisen analyytinen tarkastelu

Seuraavaksi esitellään ensin Rehdanzin ja Tolin (2005) linkittymistä kuvaava malli (RT-malli) ja analyysi niiltä osin, kun se on tarpeellista tämän työn kannalta. Rehdanz ja Tol pyrkivät analyysillaan vastaamaan varsin spesifiin kysymykseen, joka ei ole erityisen mielenkiintoinen tämän työn kannalta. He tarkastelevat järjestelmän mahdollisuuksia vaikuttaa linkittymiskumppanin päästökattoon kauppapoliittisten painostuskeinojen avulla. Kansainvälisten ilmastoneuvottelujen nykytilanteessa heidän kysymyksenasettelu ei ole kovin relevantti. RT-mallia käytetäänkin tässä vain eräänlaisena lähtö- ja vertailukohtana linkittymisen yleisempää analyysiä silmälläpitäen.

Toiseksi esitellään Angerin (2008) linkittymistä kuvaava malli. Angerin malli on edellistä monipuolisempi mutta silti puutteellinen. Malli huomioi useamman maan tai alueen muodostamat hiilimarkkinat, kaksi sektoria näiden sisällä ja mahdolliset krediittijärjestelmät.

Kolmanneksi muodostetaan linkittymismalli, joka omaksuu monia ominaisuuksia edellisiltä. Linkittymismalli rakentuu edellisistä poikkeavasta lähtökohdasta, mikä mahdollistaa monien mikrotalousteorian perustulosten soveltamisen niin, että mallin avulla voidaan esittää tutkimuskysymyksen vaatima laaja-alainen teoreettinen analyysi tiiviisti. Poikkeavasta lähtökohdasta johtuen on lisäksi syytä osoittaa yhteys edellisiin. Rehdanzin ja Tolin sekä

Angerin mallit ovat linkittymismallin erikoistapauksia, joten niiden keskeiset tulokset pystytään esittämään myös linkittymismallin avulla.

3.1 Aiemmat mallit

3.1.1 Rehdanz–Tol-malli

3.1.1.1 Linkittyminen

Rehdanz ja Tol (2005) tarkastelevat artikkelissaan kahden paikallisen päästömarkkinan koordinoitua, kun päästökauppajärjestelmät linkitetään. Lähtökohtana on tilanne, jossa päästökauppajärjestelmät valitsevat päästörajansa itsenäisesti ja mahdollisesti muuttavat päästökattojaan linkittymisen jälkeen. Artikkelit tutkii netto-ostajamaan mahdollisuuksia vaikuttaa nettomyyjämään päätökseen hyödyntämällä kaupanrajoitteita. Netto-ostajamaa voi rajoittaa päästöoikeuksien tuontia hintainstrumenteilla (tariffi) tai määräinstrumenteilla (arvonalennus tai tuontikiintiö).

Erityisesti Rehdanz ja Tol (2005) nostavat esiin netto-ostajamaan mahdollisuuden heikentää nettomyyjämään asemaa, jos se uhkaa nostaa päästökattoaan. Ostajamaa voi siis lisätä myyjämään kustannuksia asettamalla tuontikiintiön niin, että ostajamaa ei itse kärsi kaupanrajoitteesta.

Käytännössä tarve tällaiseen toimenpiteeseen vaikuttaa marginaaliselta. Ei ole uskottavaa, että sopimus linkittymisestä solmittaisiin osapuolten välillä, jotka eivät pysty yhteisesti sopimaan päästökatoista. Ensinnäkin päästökauppajärjestelmien suunnittelijoiden keskeisenä huolenaiheena on ollut toiminnallinen luotettavuus ja päästöoikeuksien hinnan vakaus, joten linkin tarjoamia kustannussäästöjä ei tavoitella ehdoilla. Toiseksi linkittymisen tarkastelu kustannustehokkuuden parannuskeinona on mielekkäämpää tilanteessa, jossa valtiot ovat perustaneet paikallisia, päästövähennyksiin tähtääviä päästökauppajärjestelmiä. Jotta tällainen tilanne olisi todennäköinen, edellytetään, että teollisuusmaat ovat sopineet UNFCCC:n¹² puitteissa sitovista

¹² United Nations Framework Convention on Climate Change, ilmastonmuutosta koskeva YK:n puitesopimus eli ns. ilmastopopimus.

päästötavoitteista, jotka estävät teollisuusmaita lisäämästä päästöoikeuksia mielivaltaisesti.

Toisaalta toisen maan päästökattoon vaikuttaminen saattaa muodostua hyödylliseksi tilanteissa, joissa valtioidenvälisen ilmastopimuksen jäsen uhkaa ajautua sopimusrikkoon. Tällaisissa non-compliance -tilanteissa kansainvälisen sopimuksen sanktiot saattavat olla tehottomia. (Rehdanz ja Tol 2005.) Yritystason päästökauppajärjestelmien tapauksessa tällaista tarvetta ei ole, sillä yritysten sanktioiminen on suoraviivaisempaa. Jos jäsenmaa rankaisee kotimaisia yrityksiä päästökauppajärjestelmän sääntöjä mukaisesti, niin jäsenmaan kokonaispäästöjen ei pitäisi ylittää asetettua päästökattoa.

Mielenkiintoisen Rehdanzin ja Tolin artikkelista (2005) tekee malli, jonka avulla linkittymistilannetta tarkastellaan. Malli on hyvin yksinkertainen, mutta sen avulla voidaan selvittää eräitä keskeisiä linkittymiseen liittyviä perustuloksia.

Vaikkei tätä mainitakaan, lopputuloksista päätellen malli olettaa, että paikallisilla hiilimarkkinoilla vallitsee täydellinen kilpailu ja että mallissa tarkastellaan kunkin maan edustavaa yritystä.

Ilman linkkiä mallin maat A ja B pyrkivät minimoimaan päästöjen vähentämisen aiheuttamia kustannuksiaan $C_A = \alpha_A R_A^2$ ja $C_B = \alpha_B R_B^2$ niin, että kunkin maan päästövähennys $R \geq 0$ on vähintään asetetun päästövähennystavoitteen $T > 0$ suuruinen¹³:

$$(3.1) \quad \begin{aligned} \min_{R_A} \alpha_A R_A^2 \quad & \text{ehdolla } R_A \geq T_A \quad \text{ja} \\ \min_{R_B} \alpha_B R_B^2 \quad & \text{ehdolla } R_B \geq T_B, \end{aligned}$$

jossa maan päästövähennyspotentiaalia kuvaavat parametrit α_A ja α_B ovat positiivisia ja $\alpha_A > \alpha_B$.¹⁴ Toisin kuin artikkeli olettaa, tämä ei riitä teke-

¹³ Epäyhtälöt on täydennetty Rehdanzin ja Tolin (2005) esitykseen.

¹⁴ Rehdanz ja Tol (2005) käyttää merkintätapaa

$$\begin{aligned} \min_{R_A} C_A &= \alpha_A R_A^2, \text{ kun } R_A \geq T_A \\ \min_{R_B} C_B &= \alpha_B R_B^2, \text{ kun } R_B \geq T_B. \end{aligned}$$

mään maasta A määritelmällisesti netto-ostajaa. Kuten myöhemmin nähdään, tähän vaaditaan, että $\alpha_A T_A > \alpha_B T_B$. Minimointiongelman (3.1) ilmeisenä ratkaisuna $R_A = T_A$ ja $R_B = T_B$, jolloin rajakustannukset ovat $2\alpha_A R_A$ ja $2\alpha_B R_B$.

Seuraavaksi paikalliset hiilimarkkinat yhdistetään. Rehdanzin ja Tolin (2005) minimointiongelmiin muotoilu jää puutteellisen esityksen vuoksi epäintuitiiviseksi ja edellyttää tarpeettomia muuttujia.¹⁵ Myös ratkaisutavan esitys on hyvin epämääräinen, eikä varsinaista ratkaisumenetelmää tai ratkaisun vaihteita ei esitetä.¹⁶

Tässä optimointiongelma esitetään muodossa, joka vastaa myöhemmin esiteltävän linkittymismallin muotoilua. Näin Rehdazin ja Tolin saamaan ratkaisuun päästään huomattavasti helpommin. Maa A valitsee päästövähennysten määrän R_A minimoidakseen kustannuksensa $\alpha_A R_A^2 + \pi(T_A - R_A)$, missä π on päästöoikeuksien hinta. Maa joutuu maksamaan päästöistä, jos sen tekemien päästövähennysten määrä alittaa päästövähennystavoitteen. Maan B optimointiongelma muotoillaan vastaavasti. Päästöoikeuksien hinta määräytyy ehdosta, jonka mukaan yhteenlaskettujen päästövähennysten on oltava vähintään päästövähennystavoitteiden summa. Formaalisti tämä voidaan

¹⁵ Rehdanzin ja Tolin (2005) esityksessä minimointiongelma on esitetty seuraavasti:

$$\begin{aligned}\min_{R_A} C_A &= \alpha_A R_A^2 + \pi P, \text{ kun } R_A + P \geq T_A \\ \min_{R_B} C_B &= \alpha_B R_B^2 - \pi P, \text{ kun } R_B - P \geq T_B,\end{aligned}$$

jossa $\pi \geq 0$ on päästöoikeuksien hinta ja $P \geq 0$ on maasta B maahan A myytyjen päästöoikeuksien määrä. Oletus muuttujien positiivisuudesta on täydennetty alkuperäiseen esitykseen.

¹⁶ Lopputuloksista päätellen optimointiongelmissa on muodostettu Lagrangen funktiot

$$\begin{aligned}L_A(R_A, P, \lambda_A) &= \alpha_A R_A^2 + \pi P + \lambda_A(T_A - R_A - P) \\ L_B(R_B, P, \lambda_B) &= \alpha_B R_B^2 - \pi P + \lambda_B(T_B - R_B + P).\end{aligned}$$

olettaen, että maa valitsee myös muuttuja P ja että rajoitteet ovat sitovia. Muuttujan P valintaa ei ole perusteltu, eikä se esiinny alkuperäisissä optimointilausekkeissa. Myöskään rajoitteiden sitovuutta ei ole perusteltu. Ratkaisu saadaan asettamalla Lagrangen funktioiden osittaisderivaatat nolllaksi.

esittää siten, että

$$\begin{aligned} \min_{R_A} \alpha_A R_A^2 + \pi(T_A - R_A) \quad \text{ja} \\ \min_{R_B} \alpha_B R_B^2 + \pi(T_B - R_B), \end{aligned}$$

kun lisäksi pätee ehto $R_A + R_B \geq T_A + T_B$, joka takaa päästövähennystavoitteiden täyttymisen.

Minimointiongelmat ratkaistaan aluksi olettaen, että $R_A, R_B \in \mathbb{R}$. Kuitenkin seuraavaksi nähdään, että ratkaisut ovat positiivisia, jolloin ensimmäisen asteen ehdot pätevät myös tapauksessa $R_A, R_B \geq 0$. Näin ratkaisu löytämiseksi ei tarvita Karush–Kuhn–Tuckerin-ehtoja.

Minimointiongelmiä ensimmäisen asteen ehdot ja päästövähennysehto muodostavat yhtälöryhmän

$$(3.2a) \quad 2\alpha_A R_A - \pi = 0$$

$$(3.2b) \quad 2\alpha_B R_B - \pi = 0$$

$$(3.2c) \quad R_A + R_B \geq T_A + T_B,$$

jossa päästövähennysehto (3.2c) on sitova, kun kaikki päästöoikeudet käytetään.¹⁷ Koska kustannusfunktio on aidosti konvekksi, niin yhtälöryhmä (3.2) antaa ratkaisulle sekä riittävät että välttämättömät ehdot.¹⁸

¹⁷ Rehdanz ja Tol (2005) saavat optimointiongelman ensimmäisen asteen ehdoiksi:

$$\begin{array}{lll} 2\alpha_A R_A - \lambda_A = 0 & \pi - \lambda_A = 0 & -(R_A + P - T_A) = 0 \\ 2\alpha_B R_B - \lambda_B = 0 & -\pi + \lambda_B = 0 & -(R_B - P - T_B) = 0, \end{array}$$

joka on ekvivalentti yhtälöryhmän (3.2) kanssa, kun epäyhtälö (3.2c) on sitova, $\pi = \lambda_A = \lambda_B$ ja $P \equiv T_A - R_A$.

¹⁸ Rehdanz ja Tol (2005) ei tarkista ratkaisunsa toisen asteen ehtoja. Ratkaisun riittävyys nähdään kuitenkin tarkastelemalla Hessin determinantin etumerkkiä. Maan A Hessin determinantti

$$|H_A| = \begin{vmatrix} 2\alpha_A & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{vmatrix} = 2\alpha_A \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} - 1 \cdot 0 = -2\alpha_A < 0, \text{ koska } \alpha_A > 0.$$

Sijoittamalla yhtälöt (3.2a) ja (3.2b) epäyhtälöön (3.2c) saadaan

$$\pi \geq \left(\frac{1}{2\alpha_A} + \frac{1}{2\alpha_B} \right)^{-1} (T_A + T_B) = \frac{2\alpha_A\alpha_B}{\alpha_A + \alpha_B} (T_A + T_B).$$

Kun oletetaan, että hinta määräytyy siten, että markkinat tyhjentyvät, edellinen epäyhtälö on sitova ja markkinahinta π määräytyy yksikäsitteisesti. Saatu markkinahinta π vastaa Rehdanzin ja Tolin (2005) ratkaisua.

Sijoittamalla markkinahinta π yhtälöihin (3.2a) ja (3.2b) saadaan optimaaliset päästövähennysten määrät

$$(3.3) \quad R_A = \frac{\alpha_B}{\alpha_A + \alpha_B} (T_A + T_B) \quad \text{ja}$$

$$(3.4) \quad R_B = \frac{\alpha_A}{\alpha_A + \alpha_B} (T_A + T_B),$$

jotka vastaavat artikkelin ratkaisuja.

Päästöoikeuksien viennin määrä $P \equiv T_A - R_A = R_B - T_B$ saadaan sijoittamalla ratkaisu (3.3) määritelmään, jolloin

$$(3.5) \quad P = \left(1 - \frac{\alpha_B}{\alpha_A + \alpha_B} \right) T_A - \frac{\alpha_B}{\alpha_A + \alpha_B} T_B = \frac{1}{\alpha_A + \alpha_B} (\alpha_A T_A - \alpha_B T_B),$$

joka vastaa artikkelin ratkaisua. Samalla nähdään, että maa A on netto-ostaja eli $P > 0$, jos ja vain jos $\alpha_A T_A > \alpha_B T_B$.

Ratkaisuista voidaan tehdä joitain yleisiä johtopäätöksiä. Optimissa päästövähennysten rajakustannukset $\frac{dC}{dR_A}$ ja $\frac{dC}{dR_B}$ ovat yhtä suuria kuin päästöoikeuksien hinta π . Tämä voidaan tulkita siten, että päästövähennystavoitteen kiristämien yhdellä yksiköllä aiheuttaisi päästöoikeuden hinnan suuruisen lisäkustannuksen. (Ks. Rehdanz ja Tol 2005.)

Toiseksi nähdään, että molemmat osapuolet hyötyvät linkistä. Ostaja-

Vastaavasti maan B Hessin determinantti

$$|H_B| = \begin{vmatrix} 2\alpha_B & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2\alpha_B \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} - 1 \cdot 0 = -2\alpha_B > 0, \text{ koska } \alpha_B > 0.$$

Koska rajoitteita on molemmissa tapauksessa yksi, Hessin determinantin negatiivisuudesta seuraa, että ratkaisut ovat minimejä.

maan päästövähennyksistä aiheutuvat kustannukset laskevat ja myyjämaa saa tuottoja päästöoikeuksista. Ostajamaan varjohinta laskee ja myyjämaan varjohinta nousee. (Rehdanz ja Tol 2005.)

Kolmanneksi yhtälöstä (3.5) nähdään, että kaupanmäärä P kasvaa, kun maiden väliset erot päästövähennystavoitteissa T_A ja T_B tai päästövähennysmahdollisuuksia kuvaavissa parametreissa α_A ja α_B kasvavat.

3.1.1.2 Kaupanrajoitteet

Seuraavaksi Rehdanz ja Tol (2005) siirtyvät tarkastelemaan keinoja, joilla maa A voi rajoittaa päästöoikeuksien kauppaa päästökauppajärjestelmien välillä. Lisäksi tarkastellaan kansainväliseen päästökauppaan liittyviä vastuukysymyksiä, mutta nämä sivuutetaan.

Ensinnäkin, maa A rajoittaa kaupankäyntiä siten, että järjestelmän B päästöoikeudet oikeuttavat nimellisarvoaan pienempiin päästöihin järjestelmässä A . Kustannusten minimointiongelma muodostuu:

$$\min_{R_A} \alpha_A R_A^2 + \frac{\pi}{d}(T_A - R_A) \quad \text{ja} \\ \min_{R_B} \alpha_B R_B^2 + \pi(T_B - R_B),$$

kun lisäksi pätee $\frac{1}{d}R_A + R_B \geq \frac{1}{d}T_A + T_B$, jossa $0 \leq d \leq 1$ on arvonvähennyskerroin.¹⁹ Esimerkiksi, jos $d = 1/2$, niin järjestelmän A yritys voi tuottaa 0,5 hiilidioksiditonnia päästöjä jokaista järjestelmän B päästöoikeutta kohden.

Toiseksi, maa A rajoittaa päästöoikeuksien tuontia asettamalla järjestel-

¹⁹ Rehdanz ja Tol (2005) muotoilee minimointiongelman alunperin seuraavasti:

$$\min_{R_A} C_A = \alpha_A R_A^2 + \pi P, \text{ kun } R_A + dP \geq T_A \\ \min_{R_B} C_B = \alpha_B R_B^2 - \pi P, \text{ kun } R_B - P \geq T_B.$$

Kun epäyhtälöt ovat sitovia, niin $P = \frac{1}{d}(T_A - R_A) = R_B - T_B$ ja saadaan esitetty yksinkertaisempi muotoilu minimointiongelma. Ratkaisut ovat samat molemmissa muotoiluissa.

män B päästöoikeuksien käytölle suhteellisen rajoitteen γ , jolloin

$$\begin{aligned} \min_{R_A} \alpha_A R_A^2 + \pi(T_A - R_A) \quad \text{ehdolla} \quad (1 + \gamma)R_A \geq \gamma T_A \quad \text{ja} \\ \min_{R_B} \alpha_B R_B^2 + \pi(T_B - R_B), \end{aligned}$$

kun lisäksi pätee $R_B + R_A \geq T_A + T_B$, jossa $0 \leq \gamma \leq 1$ on suhteellinen tuontikiintiö.²⁰ Rehhdanzin ja Tolin (2005) esimerkistä on apua myöhemmin alaluvussa 4.1.4, kun tarkastellaan siirtymistä perinteisistä krediittijärjestelmistä NL-järjestelmiin olettaen, että hiilimarkkinoilla on tuontikiintiö.

Kolmanneksi, maa A rajoittaa päästöoikeuksien tuontia asettamalla järjestelmän B päästöoikeuksien käytölle tariffin t , jolloin

$$\begin{aligned} \min_{R_A} \alpha_A R_A^2 + t\pi(T_A - R_A) \quad \text{ja} \\ \min_{R_B} \alpha_B R_B^2 + \pi(R_B - T_B), \end{aligned}$$

kun lisäksi pätee $R_B + R_A \geq T_A + T_B$, jossa $0 \leq t \leq 1$.²¹

Kiintiö- ja tariffirajoitteiden osalta tilanne vastaa pitkälti yleistä kansainvälisen kaupan problematiikkaa, eikä päästökauppa merkittävästi eroa tavarakaupasta. Tosin mielenkiintoisen poikkeuksen luo mahdollisuus käyttää arvonlennusta kaupanrajoitteena. Koska hiilimarkkinoiden perustana toimiva päästökauppajärjestelmä määrittelee, miten toisen järjestelmän päästöyksi-

²⁰ Rehhdanz ja Tol (2005) muotoilee minimointiongelman alunperin seuraavasti:

$$\begin{aligned} \min_{R_A} C_A = \alpha_A R_A^2 + \pi P, \quad \text{kun } R_A + P \geq T_A \text{ ja } R_A \geq \gamma P \\ \min_{R_B} C_B = \alpha_B R_B^2 - \pi P, \quad \text{kun } R_B - P \geq T_B. \end{aligned}$$

Kun epäyhtälöt ovat sitovia, niin $P = T_A - R_A = R_B - T_B$ ja saadaan esitetty yksinkertaisempi muotoilu minimointiongelma. Ratkaisut ovat samat molemmissa muotoiluissa.

²¹ Rehhdanz ja Tol (2005) muotoilee minimointiongelman alunperin seuraavasti:

$$\begin{aligned} \min_{R_A} C_A = \alpha_A R_A^2 + t\pi P, \quad \text{kun } R_A + P \geq T_A \\ \min_{R_B} C_B = \alpha_B R_B^2 - \pi P, \quad \text{kun } R_B - P \geq T_B, \end{aligned}$$

Kun epäyhtälöt ovat sitovia, niin $P = T_A - R_A = R_B - T_B$ ja saadaan esitetty yksinkertaisempi muotoilu minimointiongelma. Ratkaisut ovat samat molemmissa muotoiluissa.

köitä voidaan hyödyntää, se voi samalla määrittää, minkälainen käyttöarvo vierailla päästöyksiköillä on suhteessa oman järjestelmän päästöyksiköihin. Tällaista mahdollisuutta ei tavallisten hyödykkeiden kohdalla ole.

Rehdanzin ja Tolin (2005) artikkeli lienee ensimmäinen akateeminen julkaisu linkittymisestä, mikä selittää sitä, että kokonaisuudessaan esitys on varsin kömpelö. Mallin käsittely helpottuu huomattavasti, kun matemaattinen sisältö muotoillaan yksinkertaisempaan mutta ekvivalenttiin asuun, kuten tässä on tehty. Rehdanzin ja Tolin malli on liian rajoittunut linkittymisen laaja-alaiseen arviointiin. Ensimmäinen malli ei erottele yksittäisten yritysten asemaa, joten sen avulla ei pysty suoraan arvioimaan linkittymisen distribuutiovaikutuksia. Toiseksi malli ei kuvaa krediittijärjestelmiä, jotka ovat keskeisessä osassa UNFCCC:n puitteissa käytävissä kansainvälisissä ilmastoneuvotteluissa, siksi mallia ei voi hyödyntää vaihtoehtoisten sopimusratkaisujen aiheuttamien ilmastopoliittisten kustannusten vertailuun. Kolmanneksi malli ei huomioi yritysten varsinaista tuotantotoimintaa, joten kilpailukykyvaikutusten arviointi ei ole mahdollista. Neljänneksi mallin käyttämän yksinkertaisen yhtälömuodon perusteella on vaikea nähdä, missä määrin tulokset ovat yleistettävissä.

3.1.2 Angerin malli

Angerin mallissa (2008) kuvataan R aluetta (tai maata), jotka jakautuvat kahteen sektoriin: päästökaupan piiriin kuuluvat toimialat, EIS , ja sen ulkopuoliset toimialat, $NEIS$.²² Alueen $r = 1, \dots, R$ päästötavoite (päästökatto) on \bar{E}_r ja päästövähennyskustannuksia (abatement cost) päästökauppasektorilla merkitään $AC_r^{EIS}(e_r^{EIS})$, jossa e_r^{EIS} on päästöjen määrä. Vastaavasti päästökaupan ulkopuolisesta sektorista käytetään merkintää $AC_r^{NEIS}(e_r^{NEIS})$. Lisäksi merkitään $AC_r(E_r) = AC_r^{EIS}(e_r^{EIS}) + AC_r^{NEIS}(e_r^{NEIS})$, jossa $E_r = e_r^{EIS} + e_r^{NEIS}$. Anger (2008) olettaa, että kustannusfunktiot AC ovat vähene-

²² EIS, energy-intensive sector. NEIS, non-energy-intensive sector.

viä²³, konvekseja ja differentoituvia päästömäärän e suhteen.²⁴

Alueet toimivat kilpailullisilla markkinoilla ja voivat ostaa päästöoikeuksia kansainvälisiltä markkinoilta eksogeeniseen hintaan σ .²⁵ Alue pyrkii minimoimaan päästövähennyskustannuksiaan siten, että

$$(3.6) \quad \min_{e_r^{EIS}, e_r^{NEIS}} [AC_r^{EIS}(e_r^{EIS}) + AC_r^{NEIS}(e_r^{NEIS}) + \sigma(e_r^{EIS} + e_r^{NEIS} - \bar{E}_r)]$$

Jos lauseke $e_r^{EIS} + e_r^{NEIS} - \bar{E}_r$ on positiivinen, alue on nettoviejä. Vastaavasti, jos lauseke on negatiivinen, alue on netto-ostaja.

Jos alue on toimii krediittijärjestelmässä, sillä ei ole päästötavoitetta, joten se pyrkii maksimoimaan krediittien myynnistä saadut tulot

$$\sigma(\bar{E}_r - e_r^{EIS} - e_r^{NEIS}) - AC_r^{EIS}(e_r^{EIS}) - AC_r^{NEIS}(e_r^{NEIS}),$$

jossa \bar{E}_r vastaa alueen arvioituja BAU-skenaarion mukaisia päästöjä.

Mallin ratkaisun ensimmäisen asteen ehdoiksi saadaan yhtälöt

$$(3.7) \quad \sigma = -\frac{\partial AC_r^{EIS}}{\partial e_r^{EIS}} = -\frac{\partial AC_r^{NEIS}}{\partial e_r^{NEIS}},$$

joten myös

$$(3.8) \quad \sigma = -\frac{\partial AC_r}{\partial (e_r^{EIS} + e_r^{NEIS})}.$$

Koska kustannusfunktiot ovat (aidosti) konvekseja, ensimmäisen asteen ehdoista voidaan suoraan ratkaista (yksikäsitteiset) optimaaliset päästömäärät $E_r^* = e_r^{EIS*} + e_r^{NEIS*}$. Päästöoikeuksien nettokysyntä on päästötavoitteen ja optimaalisen kokonaispäästömäärän erotus, $\bar{E}_r - E_r^*$.

²³ Huomaa, että toisin kuin RT-mallissa, tässä kustannustaso riippuu päästömäärästä eikä päästövähennysten määrästä. Siksi kustannuskäyrä on vähenevä toisin kuin edellisessä RT-mallissa.

²⁴ Tässä tulisi olettaa, että funktiot ovat jatkuvasti derivoituvia ja että optimointiongelma täyttää jonkin säännöllisyysehdon (regularity condition) kuten Slaterin ehdon. Lisäksi aito konveksisuus takaisi ratkaisun yksikäsitteisyyden.

²⁵ Angerin (2008) tekstissä esiintyy myös muuttuja s , mutta esitystä on tässä tulkittu siten, että $s = \sigma$, sillä kyseessä lienee kirjoitusvirhe.

Mallinsa avulla Anger (2008) pystyy tekemään eräitä yleisiä johtopäätöksiä linkittymisen vaikutuksista ilmastopolitiikan kustannustehokkuuteen. Mallin avulla tarkastellaan kahdenlaista markkinarakennetta: Ensimmäisessä on yksi alue, joka voi ostaa päästöoikeuksia kilpailullisilta, kansainvälisiltä markkinoilta. Toisessa on kaksi aluetta, joiden energiantensiivisiä sektoreita säätelevät päästökauppajärjestelmät ovat linkittyneet. Muut sektorit voivat ostaa krediittejä kansainvälisiltä markkinoilta. Molemmissa tapauksissa osoitetaan, että linkki pienentää ilmastopolitiikan kustannuksia ja siten parantaa kustannustehokkuutta.

Angerin mallissa on puutteita. Ensimmäinen malli ei määrittele, miten päästöyksiköiden hinnat määrittyvät. Myöhemmin nähdään, että hinnanmuutosten arviointi on ehdottoman tärkeää linkittymisen vaikutusten arvioinnissa. Toiseksi malli ei erottele yksittäisten yritysten asemaa, joten sen avulla ei pysty suoraan arvioimaan linkittymisen distribuutiovaikutuksia. Kolmanneksi mallin ei salli erityyppisiä krediittijärjestelmiä, joten esimerkiksi NL-järjestelmien arvioiminen on mahdotonta. Neljänneksi malli ei huomioi yritysten varsinaista tuotantotoimintaa, joten se ei huomioi esimerkiksi muutoksia tuote- ja panosmarkkinoilla, eikä kilpailukykyvaikutusten arviointi ole mahdollista.

Kvantitatiivisen analyysin perusteella Angerin (2008) päättelee, että paikallisten yritystason päästökauppajärjestelmien vaikutus ilmastopolitiikan kustannustehokkuuteen on hyvin pieni. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että päästövähennyksiä ei allokoita tehokkaasti energiantensiivisen sektorin ja muiden sektoreiden välillä. Paikallisten päästökauppajärjestelmien ulkopuoliset sektorit eivät hyödy linkistä, vaikka niihin kohdistuu suhteessa suurin kustannustaakka. Sen sijaan Anger ehdottaa Kioto-yksiköiden rajoittamatonta käyttöä myös paikallisten päästökauppajärjestelmien ulkopuolisilla sektoreilla, minkä arvioidaan vähentävän kustannuksia merkittävästi. (Anger 2008.) Käytännössä tämä vastaisi paikallisten kiintiöjärjestelmien ja kansainvälisten krediittijärjestelmien linkittämistä yhdeksi rajoittamattomaksi kokonaisuudeksi.

3.2 Linkittymismalli

Rehdanzin ja Tolin (2005) sekä Angerin (2008) linkittymistä kuvaavat mallit ovat hyvin yksinkertaisia. Ne sivuuttavat eräitä keskeisiä linkittymisen vaikutuksia eivätkä anna riittävää kuvaa päästökauppajärjestelmien ominaispiirteistä, joten ne eivät sovellu linkittymisen talouspoliittisten kustannusten arviointiin tai kerro linkittymisen ilmastopoliittisista vaikutuksista.

Keskeinen puute syntyy siitä, että tuotantoyksikkö nähdään ainoastaan päästövähennysten tuottajana. Ellei kyse ole päästöjen takaisinottoprojekteista tämä lähestymistapa sivuuttaa yritysten ensisijaisen tuotantotoiminnan. Todellisuudessa yritys tuottaa päästöjä varsinaisen tuotannon sivutuotteena. Toisin sanoen yritys tuottaa päästöjä, ei päästövähennyksiä.

Seuraavassa muodostettava *linkittymismalli* kuvaa yrityksen valinnan tavalla, joka huomioi päästöt osana yrityksen varsinaista toimintaa ja siten malli paremmin vastaa todellista valintatilannetta. Tarkastelun lähtökohtana on asetelma, jossa yritys voi valita ympäristöystävällisemmän tuotantotavan tuotannon määrän kustannuksella. Tästä lähtökohdasta muotoillaan tuotantofunktio, joka on paremmin käsiteltävissä ja joka kytkeytyy luontevasti yleiseen yrityksen valinnan teoriaan.

Linkittymismallissa päästöt – tai oikeus tuottaa päästöjä – nähdään tuotantontekijänä, jolle muodostuu hinta, kun päästöjä rajoitetaan. Tällaista muotoilua ei esiinny tätä tutkielmaa varten kerätyssä kirjallisuudessa, vaikkakin jo päästökaupan taloustieteellisten perusteiden klassikko Ronald Coase (1960) esitti, että *oikeutta* tuottaa päästöjä tulisi ajatella juuri tuotantontekijänä.

Kun oletetaan, että yritykset eivät tuhlaa resursseja, kaikki päästöoikeuden päätyvät käyttöön. Päästöoikeuksien käyttö tarkoittaa, että yritys luovuttaa järjestelmän ylläpitäjälle tuottamiaan päästöjä vastaavan määrän päästöoikeuksia. Näin päästöjen tuottaminen ja oikeus tuottaa päästöjä nivoutuvat yhteen. Päästöjä tuotetaan yhtä paljon kuin päästöoikeuksia käytetään.

Päästökauppaa kuvaavien mallinen ryhmässä linkittymismalli rinnastuu yksinkertaiseen assimiloituvien ja tasaisesti leviävien saasteiden (uniformly

mixed assimilative pollutants) malliin (ks. Tietenberg 2006, luku 2). Vaikka ilmastonmuutokseen vaikuttavat kasvihuonekaasut ovat luonteeltaan akkumulatiivisia, tässä oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi päästöt assimiloituviksi. Oletuksen seurauksena tarkastelu voidaan rajata yhteen periodiin.

Todellisuudessa ilmaston keskilämpötilaan vaikuttavan säteilypakotteen voimakkuus riippuu kasvihuonekaasujen pitoisuuksista – ei vuosittaisesta päästötasosta sinänsä. Siksi päästöjen tuottamisen ajankohta vaikuttaa päästöjen ympäristövaikutukseen. Oletus on kuitenkin perusteltavissa. Ensinnäkin ilmastonmuutoksen vaikutuksia lievittävässä päästökauppajärjestelmässä toimijat voivat valita jokseenkin vapaasti, milloin ne käyttävät päästöoikeutensa. Järjestelmät on siis rakennettu ikään kuin kasvihuonekaasut olisivat assimiloituvia. Siksi linkittymisen talousvaikutuksia voidaan kuvata yksinkertaisemmalla mallilla, vaikka ympäristövaikutukset saattavat muuttua hieman. Toiseksi päästökauppajärjestelmien päästökauppaudet ovat varsin lyhyitä verrattuna kasvihuonekaasujen elinkaareen ilmakehässä. Esimerkiksi Kioto-kausi on vain viisi vuotta, kun taas hiilidioksidin poistumiseen ilmakehästä saattaa kulua yli sata vuotta.

Linkittymisen distribuutiovaikutusten analysoimiseksi malli rakentuu kahdesta tasosta. Ensimmäiseksi kuvataan päästökauppajärjestelmässä toimivan yrityksen valintaa. Yritys toimii täydellisen kilpailun vallitessa ja pyrkii maksimoimaan voittoa. Toiseksi kuvataan päästökauppajärjestelmä kokonaisuutena, jota kuvaa paikallisten markkinoiden kokonaiskysyntä ja -tarjonta. Linkittymisen aiheuttamat vaikutukset heijastuvat yksittäisten yritysten tasolle eri tavoin. Tämän dikotomian ansiosta näistä distribuutiovaikutuksista saadaan aiempaa tarkempi kuva.

Päästöoikeuksiin perustuvien kiintiöjärjestelmien lisäksi määritellään malli krediittijärjestelmästä, jossa yritykset voivat päästövähennyksillään ansaita kaupattavia krediittejä. Mallissa krediittifunktio määrittää relaation tuotettujen päästövähennysten ja myönnettyjen krediittien välille. Erilaisten krediittifunktioiden avulla on mahdollista arvioida eräitä uusia krediittijärjestelmien sääntöehdotuksia (esimerkiksi ”no lose” -tavoitteita), jotka ovat nousseet keskeiseen asemaan Post-Kioto-neuvotteluissa. Aiemmin näiden analyttinen tarkastelu ei ole ollut mahdollista.

Lopuksi hahmotellaan linkittymismallin yhteys Rehdanz–Tol-malliin. RT-mallin kustannusten minimointiongelma on linkittymismallin duaaliongelma (ks. Boyd ja Vandenberghe 2004, 223). Samalla osoitetaan, että linkittymismallia voidaan käyttää myös kuvaamaan päästövähennysten tuotantoa (päästöjen tuotannon sijasta). Tässä kontekstissa valitaan yrityksen tuotantofunktio, joka vastaa RT-mallissa käytettyä päästövähennysten tuottamisen kustannusfunktioita. RT-malli on siis linkittymismallin erityistapaus.

3.2.1 Talousyksikön kuvaus

Hiilimarkkinoiden linkittymisen tarkastelu aloitetaan paikallisilla markkinoilla toimivan talousyksikön kuvauksella. Seuraavassa talousyksiköstä puhutaan yrityksenä, mutta tarkastelun kontekstista riippuen talousyksikön voidaan ajatella olevan esimerkiksi kokonaista toimialaa edustava yritys.

Tarkastelun lähtökohdaksi otetaan voittoja maksimoiva yritys, joka tuottaa päästöjä varsinaisen tuotantotoimintansa ohessa. Yritys ei siis tuota päästövähennyksiä, kuten niin kutsuttuja puhdistuskustannuksia arvioivissa malleissa. Sen sijaan päästöjen tuotanto on osa yrityksen liiketoimintaa. Tuotantoteknologia rajoittaa yrityksen valintaa siten, että päästöjen vähentäminen edellyttää joko panosten lisäämistä tai tuotannon supistamista. Annetulla panosten määrällä yritys voi valita tuottavuuden ja ympäristöystävällisyyden välillä. Tuotantomahdollisuuksia edustaa korrespondenssi, joka määrittää millaisia tuotoksen ja päästöjen yhdistelmiä yritys voi annetuilla tuotantotehtävillä tuottaa.

Täsmällisemmin ilmaistuna yrityksen tuotantomahdollisuuksia edustaa korrespondenssi $g: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathcal{P}(\mathbb{R}_+^2)$, jolla $g(x) = \{(y, \epsilon) \in \mathbb{R}_+^2 \mid y = y(x, \epsilon)\}$, ja jossa $x \in \mathbb{R}_+$ on käytettyjen panosten määrä, $y \in \mathbb{R}_+$ on tuotannon määrä ja $\epsilon \in \mathbb{R}_+$ on tuotannon ohessa syntyneiden päästöjen määrä.²⁶ Lisäksi funktio $y: \mathbb{R}_+^2 \rightarrow \mathbb{R}_+$ on konkaavi ja $y \in \mathcal{C}^2$.

Seuraavaksi tuotantokorrespondenssille on syytä asettaa rajoitteita, jotka helpottavat analyysiä. Olkoon $\frac{\partial y}{\partial x} > 0$ eli tuotannon määrää voidaan lisätä lisäämällä panoksia, kun päästöt pidetään vakiona. Samoin $\frac{\partial y}{\partial \epsilon} > 0$ eli tuo-

²⁶ $\mathbb{R}_+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x \geq 0\}$ ja $\mathcal{P}(\mathbb{R}_+^2) = \{A \subset \mathbb{R}_+^2\}$.

tannon tasoa voidaan kasvattaa luopumalla ympäristöystävällisyydestä. Nyt annettu tuotannontaso voidaan saavuttaa pienemmillä päästöillä, jos panoksia käytetään enemmän, toisin sanoen $\frac{\partial \epsilon}{\partial x}|_{y=y_0} < 0$. Lisäksi oletetaan, että yrityksellä on laskeva rajatuottavuus eli $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial \epsilon^2} < 0$, ja että $g(0) = \{(0, 0)\}$.

Edelliset rajoitteet eivät vielä anna tarkkaa kuvaa tuotannon ja päästöjen suhteesta. Esimerkiksi esitetyt puitteet sallivat tuotantokorrespondenssin, jolla yritys voisi kasvattaa tuotantoaan rajatta kasvattamalla päästöjään rajatta. Tältä ongelmalta vältytään olettamalla, että päästöistä aiheutuu yksityisiä kustannuksia (private cost). Tuotantokorrespondenssi otetaan kuitenkin lähtökohdaksi, sillä se edustaa yrityksen vaihtoehtoja suurpiirteisesti ja se yksinkertaistaa analyysia huomattavasti.

Analyysi yksinkertaistuu entisestään, jos tuotantokorrespondenssi muotoillaan siten, että päästöjä ajatellaan tuotannontekijöinä (vrt. Coase 1960). Sen sijaan, että päästöjä ajateltaisiin tuotteena, jolla on negatiivinen hinta, nyt päästöt nähdään panoksena, jonka käyttö aiheuttaa yritykselle kustannuksen. Olkoon $f_{ij}: \mathbb{R}_+^2 \rightarrow \mathbb{R}_+$ konkaavi funktio, jolle $y_{ij} = f_{ij}(x_{ij}, \epsilon_{ij})$, ja joka kuvaa päästökauppajärjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ yrityksen $j = 1, \dots, \bar{j}$ tuotantomahdollisuuksia siten, että tuotoksen määrä $y_{ij} \in \mathbb{R}_+$ riippuu käytettyjen panosten määrästä $x_{ij} \in \mathbb{R}_+$ ja päästöjen määrästä $\epsilon_{ij} \in \mathbb{R}_+$.²⁷ Nyt siis funktio f_{ij} vastaa funktiota y . Olkoon lisäksi funktio f_{ij} kahdesti jatkuvasti derivoituva määrittelyjoukossaan.²⁸

Tuotantofunktiolta f_{ij} voidaan edellyttää samat ominaisuudet kuin korrespondenssilta g . Tarkemmin

$$(3.9) \quad \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_{ij}} > 0, \quad \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial x_{ij}^2} < 0, \quad \frac{\partial f_{ij}}{\partial \epsilon_{ij}} > 0, \quad \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial \epsilon_{ij}^2} < 0, \\ \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial x_{ij} \partial \epsilon_{ij}} > 0, \quad f_{ij}(\lambda x, \lambda \epsilon) = \lambda f_{ij}(x, \epsilon),$$

²⁷ Tässä siis \bar{i} on järjestelmien lukumäärä ja \bar{j} kussakin järjestelmässä olevien järjestelmien lukumäärä. Vaikka notaatio vihjaa, että jokaisessa järjestelmässä olisi saman verran yrityksiä, malli ei tätä edellytä, sillä ongelma voidaan kiertää eri tavoin. Esimerkiksi olkoon \bar{i}_j järjestelmän j yritysten lukumäärä ja $\bar{i} = \max \{\bar{i}_j \in \mathbb{N} \mid j = 1, \dots, \bar{j}\}$ asettamalla $x_k, \epsilon_k = 0$ kaikilla $k = \bar{i}_j, \dots, \bar{i}$.

²⁸ Harvinaisena poikkeuksena vastaavanlaista tuotantofunktiota käyttävät myös Baumol ja Oates (1975).

jossa $\lambda \geq 0$. Funktio f_{ij} on tyypillinen neoklassinen tuotantofunktio, jolla on vakio skaalatuotto.

Nyt siis $\{(f_{ij}(x, \epsilon), x, \epsilon) \in \mathbb{R}^3\} = \{(g_1(x), x, g_2(x)) \in \mathbb{R}^3\} \subset \mathbb{R}^3$, jossa $g(x) = (g_1(x), g_2(x))$, eli tuotantomahdollisuuksien joukko on molemmissa muotoiluissa sama.

Linkittymismallissa yrityksen ongelma vastaa tyypillistä yhden tuotteen ja kahden tuotannon tekijän tapausta. Kiintiöjärjestelmän i yritys j maksimoi voittojaan π_{ij} eli

$$(3.10) \quad \max_{x_{ij}, \epsilon_{ij}} p_{ij}^y f_{ij}(x_{ij}, \epsilon_{ij}) - p_i^x x_{ij} - p_i^\epsilon (\epsilon_{ij} - \omega_{ij}),$$

jossa p_{ij}^y on tuotetun hyödykkeen hinta, p_i^x on panoksen hinta, p_i^ϵ on päästöoikeuksien hinta ja ω_{ij} on yrityksen ilmaiseksi saamien päästöoikeuksien määrä.²⁹ Mallissa oletetaan lähtökohtaisesti, että yritys toimii hinnanottajana hyödyke- ja tuotannon tekijämarkkinoilla. Mallissa hinnat p_{ij}^y oletetaan annetuiksi ja hintojen p_i^x oletetaan määräytyvän kilpailullisesti paikallisilla panosmarkkinoilla (ks. alaluku 3.2.3). Hintojen p_i^ϵ muodostumista hiilimarkkinoilla käsitellään alaluvussa 3.2.2.

Ratkaisemalla yrityksen voitonmaksimointiongelma saadaan tuotannon tekijöiden kysynnot $x_{ij}^* = x_{ij}^*(p_{ij}^y, p_i^x, p_i^\epsilon)$ ja $\epsilon_{ij}^* = \epsilon_{ij}^*(p_{ij}^y, p_i^x, p_i^\epsilon)$.³⁰ Näistä erityisesti jälkimmäinen on mielenkiinnon kohteena, sillä se edustaa yrityksen halukkuutta tuottaa päästöjä eli toisin sanoen päästöoikeuksien kysyntää ja vastaavasti hinta p_i^ϵ edustaa päästöoikeuksien markkinahintaa.

3.2.2 Kiintiöjärjestelmän hiilimarkkinat

Päästökauppajärjestelmä asettaa rajoitteen kokonaispäästöille jakamalla rajoitetun määrän päästöoikeuksia. Päästökatto K_i määrää päästöoikeuksien

²⁹ Maksimointiongelmaan (3.10) voidaan lisätä päästöjen yksityisestä kustannuksesta \hat{p}_{ij}^ϵ riippuva termi. Kasvihuonekaasujen tapauksessa se on suhteellisen pieni, joten se jätetään pois. Jos maksimointiongelmassa (3.10) asetetaan $\omega_{ij} = 0$ ja yritykselle aiheutuva yksityinen kustannus p_i^ϵ on positiivinen, silloin maksimointiongelma vastaa tapausta, jossa yritys ei osallistu päästökauppaan.

³⁰ Myöhemmin lyhennetään siten, että $\epsilon_{ij}^*(p_{ij}^y, p_i^x, p_i^\epsilon) = \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon)$, jos muut hinnat oletetaan vakioiksi.

tarjonnan, joka on tyypillisesti joustamaton. Jotta yritys voisi tuottaa päästöjä, sen on hankittava itselleen päästöoikeuksia. Kuitenkaan yritysten tuottamien päästöjen yhteismäärä ei voi ylittää päästökattoa. Tästä syntyy rajoite päästöjen tuotannolle:

$$(3.11) \quad \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{ij}^* (p_{ij}^y, p_i^x, p_i^\epsilon) \leq K_i,$$

jossa \bar{j} on yritysten lukumäärä järjestelmässä i .

Kun hinnat p_{ij}^y ja p_i^x oletetaan annetuiksi, epäyhtälöstä (3.11) voidaan ratkaista päästöoikeuksien markkinahinta p_i^ϵ . Jos yritykset kokonaisuudessaan ovat halukkaita tuottamaan enemmän päästöjä kuin mitä päästöoikeuksia on tarjolla, päästöoikeuksista muodostuu niukka resurssi ja niille muodostuu hinta $p_i^\epsilon > 0$. Silloin epäyhtälö (3.11) on sitova.

Linkittymismallissa päästöoikeuksien alkujako voidaan toteuttaa ilmaisjakona, huutokauppaamalla tai näiden yhdistelmänä. Päästöoikeuksien kokonaistarjonnan määrä eli päästökatto voidaan jakaa kahteen osaan:

$$(3.12) \quad K_i \equiv K_i^h + \sum_{j=1}^{\bar{j}} \omega_{ij},$$

jossa K_i^h on huutokaupattava osuus ja ω_{ij} on yrityksen j ilmaiseksi saamien päästöoikeuksien määrä. Jos kaikki päästöoikeudet huutokaupataan, $\omega_{ij} = 0$ kaikilla $j = 1, \dots, \bar{j}$.

Jos yritys saa ilmaisia päästöoikeuksia, yrityksen päästöoikeuksien nettokysyntä on $\epsilon_{ij} - \omega_{ij}$, jolloin yrityksen voitto voidaan muotoilla siten, että

$$(3.13) \quad \begin{aligned} \pi_{ij} &= p_{ij}^y f_{ij}(x_{ij}, \epsilon_{ij}) - p_i^x x_{ij} - p_i^\epsilon (\epsilon_{ij} - \omega_{ij}) \\ &= p_{ij}^y f_{ij}(x_{ij}, \epsilon_{ij}) - p_i^x x_{ij} - p_i^\epsilon \epsilon_{ij} + p_i^\epsilon \omega_{ij}. \end{aligned}$$

Koska ω_{ij} on vakio ja koska täydellisen kilpailun vallitessa yritys ei voi vaikuttaa hintaan, niin termi $p_i^\epsilon \omega_{ij}$ ei vaikuta tuotannontekijöiden rajatuottavuuteen eikä siten valintaan.³¹

³¹ Tämä johtopäätös nojaa vahvasti oletukseen täydellisistä markkinoista ja käytännölli-

Kun alkujako (3.12) huomioidaan, päästörajoite (3.11) voidaan muotoilla uudelleen. Nyt hiilimarkkinat ovat tasapainossa, kun

$$(3.14) \quad \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{ij}^* (p_i^\epsilon) \leq K_i \equiv K_i^h + \sum_{j=1}^{\bar{j}} \omega_{ij}$$

$$(3.15) \quad \sum_{j=1}^{\bar{j}} (\epsilon_{ij}^* (p_i^\epsilon) - \omega_{ij}) \leq K_i^h.$$

Tästä nähdään, että tasapainohinta p_i^ϵ ei riipu siitä, miten alkujako toteutetaan, kun päästöoikeuksien kokonaismäärä K_i on annettu.

Jos yritys saa ilmaiseksi päästöoikeuksia, tasapainossa yrityksen voitto ei painu nolnaan, vaikka markkinat ovat kilpailulliset ja tuotantofunktio lineaarisesti homogeeninen. Tämä nähdään, kun yhtälön (3.13) hinnat määrätään rajatuottavuuden mukaan ja sovelletaan Eulerin homogeenisten funktioiden teoremaa:

$$(3.16) \quad \begin{aligned} \pi_{ij}^* &= p_{ij}^y y_{ij}^* - (p_i^x x_{ij}^* + p_i^\epsilon \epsilon_{ij}^*) + p_i^\epsilon \omega_{ij} \\ &= p_{ij}^y y_{ij}^* - (p_{ij}^y \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_{ij}} x_{ij}^* + p_{ij}^y \frac{\partial f_{ij}}{\partial \epsilon_{ij}} \epsilon_{ij}^*) + p_i^\epsilon \omega_{ij} \\ &= p_{ij}^y y_{ij}^* - (p_{ij}^y y_{ij}^*) + p_i^\epsilon \omega_{ij} = p_i^\epsilon \omega_{ij}. \end{aligned}$$

Yrityksen voitto on siis yhtä suuri kuin järjestelmän myöntämien ilmaisten päästöoikeuksien arvo.³²

semmässä tarkastelussa tästä oletuksesta tulisi luopua (ks. esim. Godby 2002, Hahn 1984). Aiheesta löytyy runsaasti akateemista kirjallisuutta ja esimerkiksi Suomalainen (2008) tarjoaa johdatuksen ilmastoneuvottelujen yhteydessä käytyyn keskusteluun alkujaosta. Tässä yhteydessä tämä voidaan kuitenkin olettaa, sillä tässä tarkastelun fokus ei ole alkujaon vaikutuksissa sinänsä vaan erityisesti linkittymisen vaikutuksissa alkujaon merkitykseen. Kuten myöhemmin nähdään, linkittyminen ei vaikuta alkujaon ja yrityksen valinnan riippumattomuuteen, siksi voidaan päätellä, että alkujaon problematiikka säilyy ennallaan myös linkittymisen jälkeen.

³² Tässä on hyvä huomata, että kilpailullisilla markkinoilla voi syntyä voittoa, koska yritykset eivät voi vaikuttaa saamiensa ilmaisten päästöoikeuksien määrään ω_{ij} . Näin voitto ei katoa uusien tulokkaiden myötä, sillä niille ei tässä mallissa myönnetä ilmaisjakoa. Kuitenkin käytännössä useimmat kiintiöjärjestelmät varaavat päästöoikeuksia mahdollisia uusia tulokkaita varten, mikä joissain tapauksissa vaikuttaa yritysten voittoon.

3.2.3 Aggregointi

Linkittymisen tarkasteleminen edellyttää mallia, jossa voidaan huomioida muutokset sekä yksittäisten yritysten että kokonaisten talousalueiden osalta. Päästökaupan piirissä toimivien yksittäisten yritysten kysynät aggregoituvat markkinoita luonnehtivaksi kokonaiskysynnäksi.

Järjestelmän i kokonaistarjonta ja -kysyntä saadaan summaamalla yksittäisten yritysten kysynät ja tarjonnat:

$$(3.17) \quad x_i \equiv \sum_{j=1}^{\bar{j}} x_{ij}, \quad \epsilon_i \equiv \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{ij}, \quad y_i = f_i(x_i, \epsilon_i) \equiv \sum_{j=1}^{\bar{j}} f_{ij}(x_{ij}, \epsilon_{ij}),$$

jossa x_i on panosten kokonaiskysyntä, ϵ_i päästöoikeuksien kokonaiskysyntä ja y_i kokonaistuotos. On tärkeä huomata, että kokonaistuotantofunktio säilyttää yhtälöryhmässä (3.9) määritellyt yksittäisen yrityksen tuotantofunktion ominaisuudet.

Järjestelmän i kokonaistuotoksen hinta p_i^y saadaan yritysten tai sektorien tuotoshintojen painotettuna keskiarvona, eli $p_i^y \equiv \sum_{i=1}^{\bar{j}} p_{ij}^y \frac{y_{ij}}{y_i}$.

Järjestelmän i kokonaisvoitto π_i saadaan summaamalla yksittäisten yritysten voitot ja päästöoikeuksien huutokauppatulot: Järjestelmän kokonaisnettokysyntä voidaan määritelmän (3.12) avulla jakaa termeihin, jolloin

$$(3.18) \quad \epsilon_i - K_i = \epsilon_i - K_i^h - \sum_{j=1}^{\bar{j}} \omega_{ij}.$$

Nyt yhtälöistä (3.18) ja (3.16) ja määritelmistä (3.17) saadaan kokonaisvoitto

π_i^* muotoiltua seuraavasti:

$$\begin{aligned}
(3.19) \quad \pi_i^* &= p_i^y y_i^* - p_i^x x_i^* - p_i^\epsilon (\epsilon_i^* - K_i) \\
&= \sum_{j=1}^{\bar{j}} p_{ij}^y y_{ij}^* - \sum_{j=1}^{\bar{j}} p_i^x x_{ij}^* - \sum_{j=1}^{\bar{j}} p_i^\epsilon \epsilon_{ij}^* + \sum_{j=1}^{\bar{j}} p_i^\epsilon \omega_{ij} + p_i^\epsilon K_i^h \\
&= \sum_{j=1}^{\bar{j}} (p_{ij}^y y_{ij}^* - p_i^x x_{ij}^* - p_i^\epsilon (\epsilon_{ij}^* - \omega_{ij})) + p_i^\epsilon K_i^h \\
&= \sum_{j=1}^{\bar{j}} \pi_{ij}^* + p_i^\epsilon K_i^h = p_i^\epsilon \left(\sum_{j=1}^{\bar{j}} \omega_{ij} + K_i^h \right) = p_i^\epsilon K_i.
\end{aligned}$$

Vaikka yksittäisen yrityksen voitto määräytyy täysin alkujaon perusteella, niin tässä huomataan, että aggregaattitasolla alkujaon toteutus ei vaikuta yhteenlaskettuun voittoon, jos päästökatto K_i säilyy muuttumattomana. Kun ilmaisjakoa pienennetään, päästöoikeuksien huutokaupasta saadut tulot $p_i^\epsilon K_i^h$ kasvavat.

Koska järjestelmän tasolla panosten kokonaistarjonta koostuu useista tuotantokelijöistä, kuten työvoimasta ja tuotantopääomasta, voidaan aggregaattipanosten tarjonta $x_i^s > 0$ olettaa vakioksi – ainakin lyhyellä tähtäimellä.

Järjestelmän i panosmarkkinat oletetaan kilpailullisiksi, joten yritysten voiton maksimointia rajoittaa epäyhtälö

$$x_i \equiv \sum_{j=1}^{\bar{j}} x_{ij} \leq x_i^s.$$

Kun panoshinta p_i^x on positiivinen, epäyhtälö on sitova. Tässä on siis syytä huomata, että vaikka yksittäinen yritys voi valita panoksen x_{ij} lyhyellä tähtäimellä, niin järjestelmän i kokonaistarjonta x_i^s on vakio.

Teknisessä katsannossa kokonaistarjonnan x_i^s vakioiminen mahdollistaa ensinnäkin eri kokoisten päästökauppajärjestelmien ja talousalueiden tarkastelemisen. Toiseksi, kun $x_i = x_i^s$, niin kokonaistuotantofunktio on aidosti konkaavi, jolloin maksimointiongelmaan saadaan yksikäsitteinen maksimiratkai-

su ja ensimmäisen asteen ehdot ovat sekä välttämättömiä että riittäviä.

3.2.4 Krediittijärjestelmät

Krediittijärjestelmä ei itsessään muodosta kysyntää tuottamilleen krediiteille. Tyypillisesti krediitit saavat arvonsa siitä, että kiintiöjärjestelmässä toimivat yritykset voivat käyttää niitä suoriutuakseen päästökaupan velvoitteista. Tällainen linkki kiintiö- ja krediittijärjestelmän välillä luo hiilimarkkinoille uuden tarjonnan lähteen.

Talouksyksiköt, jotka osallistuvat vapaaehtoisesti krediittijärjestelmään, tuottavat päästövähennyksiä ja saavat näistä krediittejä. Osallistujia voivat olla esimerkiksi yritykset tai erilaiset päästövähennysprojektit, mutta seuraavassa talouksyksiköistä puhutaan yrityksinä. Olkoon $\hat{\epsilon}_{kj}$ arvioitu krediittijärjestelmän k yrityksen j päästötaso ilman krediittijärjestelmän rahoittamaa päästövähennysprojektia – tämä vastaa siis BAU-skenaariota.³³ Toisin sanoen päästötaso $\hat{\epsilon}_{kj} = \epsilon_{kj}^*(\hat{p}_{kj}^\epsilon)$, jossa \hat{p}_{kj}^ϵ on päästöjen yritykselle aiheutuma yksityinen kustannus. Yksityinen kustannus koituu yritykselle ilmasto-politiikasta riippumatta. Olkoon lisäksi $r_{kj} = \hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}$ yrityksen tuottama päästövähennys.

Kun yritys tai projekti rekisteröityy krediittijärjestelmään, se saa krediittejä tuottamistaan päästövähennyksistä. Olkoon $c_k: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+$ jatkuva funktio, jonka arvo $c_{kj} = c_k(r_{kj}) = c_k(\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj})$ on yrityksen saamien krediittien määrä. Olkoon lisäksi $c_k(r) = 0$, kun $r \leq r_{kj}^{nl}$, ja $\frac{\partial c_k(r)}{\partial r} > 0$, kun $r > r_{kj}^{nl}$, jossa r_{kj}^{nl} on yrityksen j ”no lose” -päästövähennystavoite krediittijärjestelmässä k .

Jos krediittijärjestelmä myöntää jokaisesta vähennetystä hiilidioksidiekvivalentista päästötonnista yhden krediitin, niin krediittifunktio c_k saa arvon

³³ Vaikka sekä krediitti- että kiintiöjärjestelmien toimijoista käytetään samaa indeksiiä j , nämä eivät viittaa samoihin yrityksiin. Kiintiöjärjestelmän i yritys j ei siis ole sama kuin krediittijärjestelmän k yritys j . Tämä erottelu on erittäin tärkeä. Jos sama yritys voi toimia samanaikaisesti molemmissa järjestelmissä, päädytään niin sanottuun kaksoislas-kentaongelmaan, jossa päästövähennys palkitaan kahteen kertaan.

$c_k(r) = r$, kun $r \geq 0$, muuten $c_k(r) = 0$. Toisin sanoen

$$(3.20) \quad c_k(\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}) = \begin{cases} \hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}, & \text{kun } \epsilon_{kj} \leq \hat{\epsilon}_{kj}, \\ 0, & \text{kun } \epsilon_{kj} > \hat{\epsilon}_{kj}. \end{cases}$$

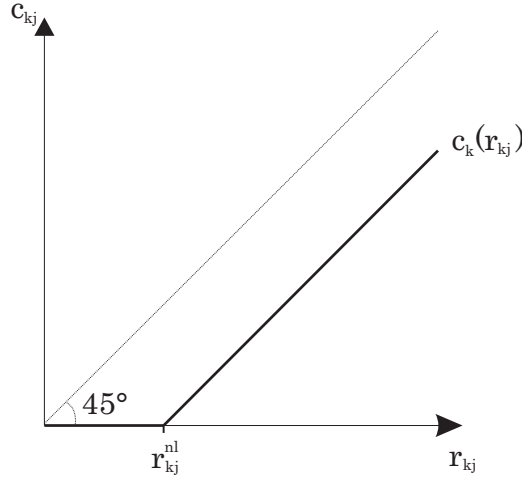
Tällainen krediittifunktio kuvaa perinteistä krediittijärjestelmää.

Jos puolestaan kyseessä on NL-järjestelmä, silloin $r_{kj}^{nl} > 0$ ja $c_k(r_{kj}) = c_k(\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}) < \hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}$ eli krediittejä myönnetään tuotettua päästövähennystä pienempi määrä. Esimerkiksi krediittifunktio

$$(3.21) \quad c_k(\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}) = \begin{cases} (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}, & \text{kun } \epsilon_{kj} \leq (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_{kj}, \\ 0, & \text{kun } \epsilon_{kj} > (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_{kj}. \end{cases}$$

myöntää krediittejä päästövähennyksistä, jotka ylittävät $\alpha \in [0, 1[$ osuuden BAU-skenaarion mukaisista päästöistä (ks. kuva 3.1). Erikoistapauksena, jos $\alpha = 0$, niin krediittifunktio on kuten perinteisessä krediittijärjestelmässä.

Kuva 3.1: Esimerkki NL-järjestelmästä



Krediittijärjestelmän k yritys j maksimoi voittoa π_{kj} eli

$$(3.22) \quad \max_{x_{kj}, \epsilon_{kj}} p_{kj}^y f_{kj}(x_{kj}, \epsilon_{kj}) - p_k^x x_{kj} - \hat{p}_k^\epsilon \epsilon_{kj} + p_k^\epsilon c(\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}),$$

jossa tuotantofunktio f_{kj} täyttää ehdot (3.9). Merkitään voitonmaksimointiongelman ratkaisua siten, että $x_{kj}^* = x_{kj}^*(p_{kj}^y, p_k^x, p_k^\epsilon)$ ja $\epsilon_{kj}^* = \epsilon_{kj}^*(p_{kj}^y, p_k^x, p_k^\epsilon)$. Tästä saadaan krediittijärjestelmässä k tuotettujen krediittien kokonaismäärä

$$(3.23) \quad c_k^*(p_k^y, p_k^x, p_k^\epsilon) = \sum_{j=1}^{\bar{j}} c_k(\hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}^*(p_{kj}^y, p_k^x, p_k^\epsilon)),$$

jossa \bar{j} on yritysten ja projektien lukumäärä, sekä krediittijärjestelmän piirissä tuotettujen päästöjen määrä

$$(3.24) \quad \epsilon_k^*(p_k^y, p_k^x, p_k^\epsilon) = \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{kj}^*(p_{kj}^y, p_k^x, p_k^\epsilon).$$

Kuten edellä, tässä ei huomioida krediittijärjestelmän ulkopuolella tuotettuja päästöjä.

Vertailemalla yhtälöitä (3.23) ja (3.24) nähdään, että krediittejä syntyy yhtä paljon kuin päästövähennyksiä vain jos krediittifunktio on kuten yhtälössä (3.20). Jos taas $c_{kj}(r_{kj}) < r_{kj}$, silloin krediittejä syntyy vähemmän kuin päästövähennyksiä. Tällaisten krediittien käyttö vähentää päästöjä.

Linkittymismallissa krediittijärjestelmä on määritelty siten, että sen avulla pystyy kuvaamaan perinteiset krediittijärjestelmät, "no lose" -tavoitteisiin perustuvat krediittijärjestelmät sekä muita vaihtoehtoisia krediittijärjestelmiä. Järjestelmän krediittifunktio c_k määrittää, miten päästövähennykset palkitaan, joten se samalla määrittää myös krediittijärjestelmän tyypin.

Toisin kuin kiintiöjärjestelmässä, krediittijärjestelmä ei muodosta kysyntää päästöyksiköille, joten krediittien markkinahintaa p_k^ϵ ei voida ratkaista vielä. Tyypillisesti krediittien kysyntä syntyy, kun järjestelmä linkitetään kiintiöjärjestelmää. Tätä käsitellään seuraavassa alaluvussa.

3.2.5 Linkittyminen

3.2.5.1 Linkittyminen kiintiöjärjestelmien välillä

Kun päästökauppajärjestelmät linkittyvät, hiilimarkkinat yhdistyvät, jolloin kokonaiskysynnat ja -tarjonnat summautuvat määrien suhteen. Näin yhteiseksi päästökatoiksi muodostuu päästökattojen summa. Tarkastellaan aluksi kahden järjestelmän linkittymistä. Olkoon $\epsilon_1^* = \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{1j}^*$ järjestelmän 1 yri-
tysten muodostama kokonaiskysyntä päästöoikeuksille ja $\epsilon_2^* = \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{2j}^*$ jär-
jestelmän 2 kokonaiskysyntä. Vastaavasti olkoon K_1 ja K_2 järjestelmien pääs-
tökatot. Järjestelmien linkittyessä päästöoikeuksien markkinahinta p^ϵ saa-
daan yhtälöstä

$$(3.25) \quad \epsilon_1^*(p^\epsilon) + \epsilon_2^*(p^\epsilon) \leq K_1 + K_2.$$

Jos päästöoikeuksia on niukasti myös linkittymisen jälkeen, epäyhtälö (3.25) on sitova ja $p^\epsilon > 0$.

Yleisemmin voidaan muotoilla, että kaikkien järjestelmien $i = 1, \dots, \bar{i}$ linkittyessä markkinahinta saadaan yhtälöstä

$$(3.26) \quad \sum_{i=1}^{\bar{i}} \epsilon_i^*(p^\epsilon) \leq \sum_{i=1}^{\bar{i}} K_i$$

eli kiintiöjärjestelmien kokonaiskysyntöjen summan tulee olla enintään pääs-
tökattojen summan suuruinen. Jos kaikkien linkittyvien järjestelmien paikal-
liset hinnat p_i^ϵ ovat positiivisia eli päästöoikeudet ovat niukka resurssi kaikissa
järjestelmissä, niin myös linkittyneiden markkinoiden hinta p^ϵ on positiivinen
ja epäyhtälö (3.26) on sitova.

3.2.5.2 Linkittyminen kiintiö- ja krediittijärjestelmien välillä

Kun krediittijärjestelmä linkitetään kiintiöjärjestelmään, päästöoikeuksien
hinta p_i^ϵ ja krediittien hinta p_k^ϵ määräytyvät epäyhtälöstä

$$(3.27) \quad \sum_{j=1}^{\bar{j}} \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon) \leq K_i + c_k^*(p_k^\epsilon),$$

Tässä on hyvä huomata, että päästöyksiköiden tarjonta ei ole enää joustamaton, kuten aiemmissa tapauksissa. Jos krediittien käytölle ei ole asetettu rajoitteita ja kiintiöjärjestelmä päästöoikeuksia on niukasti, silloin $p_i^\epsilon = p_k^\epsilon > 0$.

On kuitenkin tyypillistä, että krediittien käyttöä rajoitetaan siten, että yrityksen käyttämistä päästöyksiköistä enintään tietty osuus saa olla krediittejä. Tällöin epäyhtälöön (3.27) on lisättävä markkinoita rajoittava lisäehto

$$(3.28) \quad c_k^*(p_k^\epsilon) \leq \sum_{j=1}^{\bar{j}} \rho \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon) \leq \rho K_i,$$

jossa $\rho > 0$ on suurin sallittu osuus krediittien käytölle suhteessa päästöoikeuksiin.

Nyt päästöoikeuksien ja krediittien hinnat ovat samat vain, jos lauseen (3.28) ensimmäinen epäyhtälö ei ole sitova. Kun epäyhtälö (3.28) on sitova, silloin $p_k^\epsilon < p_i^\epsilon$, sillä krediiteistä on liikatarjontaa.

Jos krediittijärjestelmä perustuu ”no lose” -tavoitteisiin, linkittyneiden hiilimarkkinoiden tasapaino hinta määrittyy kuten edellisessä tapauksessa.

3.2.6 Päästöoikeudet varallisuutena

Päästöoikeuksien hinnanmuutos vaikuttaa myös päästöoikeuksien muodostaman varallisuuserän $p_i^\epsilon K_i$ arvoon. Kuten yhtälöstä (3.19) huomattiin, linkittymismallissa kokonaisvoitto on tämän varallisuuserän suuruinen. Yksittäisen yrityksen tapauksessa tämän varallisuuserän arvonmuutos vaikuttaa yrityksen saaman ilmaisjaon arvoon $p_i^\epsilon \omega_{ij}$. Se ei kuitenkaan vaikuta yrityksen valintaan, kun oletetaan, että rahoitusmarkkinat toimivat täydellisesti. Silloin yritys ei voi vaikuttaa päästöoikeuksien hintaa p_i^ϵ eikä ilmaisjaon määrään ω_{ij} .

Maiden tai muiden talousalueiden tapauksessa tilanne on ongelmallisempi. Järjestelmän i ylläpitäjä voi valita päästökaton K_i ja ilmaisjaon osuudet ω_{ij} . Näin se voi vaikuttaa tämän varallisuuserän arvoon. Vaikka ilmastonmuutoksen lievittämispoliittikan ensisijainen tavoite onkin vähentää päästöjä, on runsaasti keskusteltu mahdollisuudesta kerätä huutokauppatuloja päästöoikeuksien alkujasta. Tämä saattaa synnyttää ilmastopolitiikalle toissijaisen

tavoitteen maksimoidaan huutokauppatuloja $\pi_i = p_i^\epsilon K_i$ säätämällä päästökattoa K_i . Täsmällisemmin ilmaistuna

$$(3.29) \quad \max_{K_i} p_i^\epsilon(K_i) K_i,$$

jossa päästöoikeuksien hinta $p_i^\epsilon(K_i)$ on päästökatoa K_i riippuvan funktion arvo, joka määrittyy implisiittisesti markkinatasapainosta. Laajemmassa ilmasto- ja talouspoliittisessa kontekstissa tällainen eduntavoittelu tuskin olisi johdonmukaista yksittäisen, paikallisen kiintiöjärjestelmän tapauksessa.

Tilanne on kuitenkin hyvin toisenlainen, jos järjestelmä on linkittynyt osaksi laajempaa kiintiöjärjestelmien verkostoa. Tässä tapauksessa päästöoikeuksien kansainvälinen hinta $p_i^\epsilon(K_i)$ on joustamattomampi päästökaton suhteen, joten päästöoikeuksien muodostaman varallisuuserän arvoa voidaan kasvattaa ilman merkittävää muutosta päästökaupan kustannuksissa. Tätä havaintoa käsitellään tarkemmin seuraavassa alaluvussa 4.6.2.

3.2.7 Yhteys Rehdanz–Tol-malliin

Seuraavaksi osoitetaan, että Rehdanz–Tol-malli voidaan esittää edellä kuvattun linkittymismallin avulla. Samalla hahmottuu yhteys myös muihin päästövähennyksiä ja puhdistuskustannuksia tarkasteleviin malleihin.

Aluksi valitaan kokonaistuotantofunktio siten, että se vastaa RT-mallin kustannusfunktioita. Olkoon $f_A: [0, \hat{x}_A] \times [-\infty, \hat{\epsilon}_A] \rightarrow \mathbb{R}_+$ maata A edustavan yrityksen tuotantofunktio, jolla

$$f_A(x_A, \epsilon_A) = x_A - (x_A - \hat{x}_A)^2 - \alpha_A (\epsilon_A - \hat{\epsilon}_A)^2,$$

jossa \hat{x}_A , $\hat{\epsilon}_A$ ja α_A ovat positiivisia parametreja.³⁴ Olkoon $p_A^y = p_A^x = 1$ ja $p_A^\epsilon = 0$.

Nyt maan optimointiongelma ilman päästökauppaa voidaan muotoilla si-

³⁴ Mainittakoon, että funktio ei ole lineaarisesti homogeeninen, joten se ei toteuta yhtälöryhmän (3.9) viimeistä oletusta.

ten, että yritys maksimoi voittoaan

$$\pi_A(x_A, \epsilon_A) = p_A^y f_A(x_A, \epsilon_A) - p_A^x x_A - p_A^\epsilon \epsilon_A = f_A(x_A, \epsilon_A) - x_A$$

eli

$$\max_{x_A, \epsilon_A} f_A(x_A, \epsilon_A) - x_A.$$

Maksimointiongelman ilmeiseksi ratkaisuksi saadaan kysymät $x_A^* = \hat{x}_A$ ja $\epsilon_A^* = \hat{\epsilon}_A$ sekä voitto $\pi_A^* = f_A(x_A^*, \epsilon_A^*) - x_A^*$. Sijoittamalla saadut ratkaisut tuotantofunktioon nähdään, että $\pi_A^* = 0$.

Tarkastellaan seuraavaksi, kuinka maan voitto muuttuu, kun päästöjä vähennetään. Päästövähennys R voidaan määritellä alkuperäisen päästötason ja uuden päästötason erotuksena. Koska $\epsilon_A^* = \hat{\epsilon}_A$, niin

$$(3.30) \quad R \equiv \epsilon_A^* - \epsilon_A = \hat{\epsilon}_A - \epsilon_A.$$

Päästöjen vähentämisen aiheuttama kokonaiskustannus C_A voidaan muotoilla siten, että $C_A \equiv \Delta\pi_A = \pi_A^* - \pi_A(x_A^*, \epsilon_A)$. Käyttämällä voitto- ja tuotantofunktioiden määritelmiä nähdään, että

$$(3.31) \quad C_A = \alpha_A(\epsilon_A - \hat{\epsilon}_A)^2 = \alpha_A(\hat{\epsilon}_A - \epsilon_A)^2.^{35}$$

Sijoittamalla määritelmän (3.30) yhtälöön (3.31) saadaan päästövähennysten kokonaiskustannus

$$(3.32) \quad C_A = \alpha_A R_A^2,$$

joka on Rehdanz–Tol-mallissa käytetty päästövähennysten kustannusfunktio.

Rehdanz–Tol-mallin käyttämä päästövähennystavoite voidaan määritellä päästökaton avulla siten, että

$$(3.33) \quad T \equiv \hat{\epsilon}_A - K_A.$$

³⁵ Tästä voi huomata, että päästöjen vähentämisen seurauksena voitto painuu negatiiviseksi täydellisen kilpailun vallitessa. Rehdanz ja Tol (2005) sivuuttavat tämän huomion. Täydellisen kilpailun vallitessa hiilivuodon merkitys kärjistyy, kun yksittäisten yritysten asemaa heikentävät toimenpiteet ajavat yrityksen pois markkinoilta.

RT-mallin päästövähennystavoitteen T muodostaman rajoitteen yhteys päästökaton K_A muodostamaan rajoitteeseen nähdään hyödyntämällä määritelmiä (3.30) ja (3.33):

$$\epsilon_A \leq K_A \iff \hat{\epsilon}_A - R \leq K_A \iff T \leq \hat{\epsilon}_A - \epsilon_A.$$

Toisin sanoen, jos päästökatto pitää, niin alkuperäisen päästötason ja päästövähennyksen erotuksen on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin päästökatto. Ja kääntäen alkuperäisen päästötason ja nykyisen päästötason erotuksen on oltava suurempi tai yhtä suuri kuin päästövähennystavoite.

3.2.8 Esimerkki

Linkittymismallia on helppo konkretisoida esimerkillä, jossa yrityksen tuotantomahdollisuudet määritellään Cobb–Douglas-tuotantofunktion avulla. Olkoon $g(x) = \{(y, \epsilon) \mid y = x^\alpha \epsilon^{1-\alpha}\}$ ja $y = f(x, \epsilon) = x^\alpha \epsilon^{1-\alpha}$, jossa $0 < \alpha < 1$. Nyt korrespondenssi g määrittää kullekin panosmäärälle tuotantomahdollisuuksien joukon, josta yritys voi valita, kuinka paljon varsinaisen tuotannon yhteydessä tuotetaan päästöjä. Korrespondenssi g määrittelee saman tuotantojoukon kuin tuotantofunktio f , jossa päästöt ovat panoksena. Parametri α kuvaa yrityksen tuotannon hiili-intensiivisyyttä. Kun α on pieni, niin annetulla hintatasolla yrityksen optimaalinen päästö määrä on suurempi kuin yrityksellä, jonka α on suuri.

Luku 4

Päästökauppajärjestelmien linkittämisen vaikutukset

Seuraavassa käsitellään linkittymisen erilaisia vaikutuksia, jotka on jäsennetty seuraavasti: Ensimmäisenä tarkastellaan linkin vaikutusta ilmastomuutoksen lievennystoimenpiteiden kustannustehokkuuteen. Toiseksi tarkastellaan, miten kiintiöjärjestelmien linkittyminen vaikuttaa eri toimijoihin. Tavoitteena on kartoittaa, miten linkittymisen kustannukset ja hyödyt jakautuvat toimijoiden kesken. Samalla havaitaan muutoksia pääomavirroissa alueiden välillä ja niiden ulkopuolelle. Kolmanneksi käsitellään linkittymisen vaikutusta kilpailukykyyn. Neljänneksi arvioidaan linkittymisen vaikutuksia päästöihin ja päästötavoitteisiin. Viidenneksi pohditaan linkittymisen vaikutusta järjestelmien rakenteisiin ja sitä, kuinka linkki on huomioitava järjestelmän suunnittelussa. Lopuksi tarkastellaan linkin vaikutusta ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja erilaisten päästökauppajärjestelmien yhteensopivuutta.

Seuraava tarkastelu on jäsennetty linkittymisen vaikutusten suhteen. Linkittyminen on hyvin monimutkainen prosessi ja yksittäisillä tekijöillä on monenlaisia vaikutuksia. Esimerkiksi alkujakometodi vaikuttaa sekä päästöihin että kilpailukykyyn. Jäsennyksessä pitäytyen nämä vaikutukset käsitellään erillään omissa alaluvuissaan. Tärkeää on siis huomioida tarkastelun konteksti.

4.1 Kustannustehokkuus

Linkittymisen aikaansaama kustannustehokkuus perustuu pitkälti samaan periaatteeseen kuin päästökauppa yleisesti. Päästökaupan minimikustannusominaisuuden todisti alunperin Montgomery (1972). Yksinkertaisen ja paikoittain epätäsmällisen oppikirjaversioiden tästä todistuksesta tarjoaa mm. Tietenberg (2006, 27–40) sekä Hanley et al. (2007, 144–147). Edellisessä luvussa esitetyn linkittymismallin kohdalla linkittyneen päästökauppajärjestelmien verkoston tehokkuuden osoittaminen edellyttää hieman monimutkaisempaa todistusta, sillä mallin lähtökohdat ja tarkastelun konteksti ovat erilaisia.

Seuraavaksi ratkaistaan hiilimarkkinatasapainot ensimmäiseksi ilman linkkejä ja toiseksi linkkien kanssa. Kolmanneksi ratkaistaan sama olettaen utilitaristinen hyväntahtoinen suunnittelija, joka maksimoi alueiden yhteenlaskettua voittoa. Vertaamalla ensimmäisen ja toisen tilanteen ratkaisua havaitaan linkittymisen aiheuttama muutos kustannustehokkuudessa. Vastavasti toisen ja kolmannen tilanteen ratkaisua vertaamalla voidaan osoittaa, että linkittyminen johtaa Pareto-tehokkaaseen lopputulokseen. Näin voidaan osoittaa, että linkittyminen parantaa tehokkuutta. Lisäksi tarkastelu osoittaa, kuinka linkittymisen aiheuttama kustannustehokkuuden lisääntyminen riippuu paikallisten hiilimarkkinoiden hintaeroista.

Yleisen tapauksen jälkeen alaluvussa 4.1.4 tarkastellaan kiintiöjärjestelmän ja NL-järjestelmän välistä linkkiä. Alaluvussa 4.1.5 tarkastellaan koko- ja hintaerojen vaikutusta linkittymisen lopputulokseen.

4.1.1 Linkittymättömät järjestelmät

Tarkastellaan ensiksi irrallisten päästökauppajärjestelmien tapausta. Aluetta i edustava yritys pyrkii maksimoimaan voittofunktiota $\pi_i = p_i^y f_i(x_i, \epsilon_i)$, jossa $f_i(x_i, \epsilon_i)$ on alueen kokonaistuotantofunktio kaikilla $i = 1, \dots, \bar{i}$. Tois-
taiseksi riittää olettaa, että funktio $f_i: \mathbb{R}_+^2 \rightarrow \mathbb{R}_+$ on konkaavi ja jatkuvasti derivoituva määrittelyjoukossaan. Tässä voittofunktiossa ei huomioida tuotantontekijöiden aiheuttamia kustannuksia, sillä tuotantontekijät hankitaan paikallisilta markkinoilta ja kustannukset syntyvät tarjontarajoitteista. Oletetaan, että kaikilla markkinoilla vallitsee täydellinen kilpailu. Olkoon tuo-

toshinta $p_i^y > 0$ annettu ja sama kaikissa järjestelmissä, jolloin indeksi voidaan jättää pois. Paikalliset panosmarkkinoilla tarjonta $x_i^s > 0$ on annettu, joten ehto $x_i \leq x_i^s$ pätee. Alueen i kiintiöjärjestelmän päästökatto $K_i > 0$ rajoittaa päästöjen kokonaismäärää ϵ_i siten, että ehto $\epsilon_i \leq K_i$ pätee.

Kullekin alueelle i voitonmaksimointiongelma voidaan muotoilla siis seuraavasti:

$$(4.1) \quad \max_{x_i, \epsilon_i} p^y f_i(x_i, \epsilon_i) \quad \text{ehdoilla } x_i \leq x_i^s \text{ ja } \epsilon_i \leq K_i.$$

Tästä voidaan muodostaa avuksi Lagrangen funktio

$$(4.2) \quad L_i(x_i, \epsilon_i, \gamma_i, \lambda_i) = p^y f_i(x_i, \epsilon_i) - \gamma_i(x_i - x_i^s) - \lambda_i(\epsilon_i - K_i),$$

jossa $\gamma_i, \lambda_i \geq 0$ ovat Lagrangen kertoimia. Tästä saadaan Karush–Kuhn–Tuckerin ehdot (KKT-ehdot):

$$(4.3a) \quad \frac{\partial L_i}{\partial x_i} = p^y \frac{\partial f_i}{\partial x_i}(x_i^*, \epsilon_i^*) - \gamma_i^* \leq 0, \quad x_i^* \frac{\partial L_i}{\partial x_i} = 0$$

$$(4.3b) \quad \frac{\partial L_i}{\partial \epsilon_i} = p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^*, \epsilon_i^*) - \lambda_i^* \leq 0, \quad \epsilon_i^* \frac{\partial L_i}{\partial \epsilon_i} = 0$$

$$(4.3c) \quad \gamma_i^* \frac{\partial L_i}{\partial \gamma_i} = \gamma_i^*(x_i^* - x_i^s) = 0, \quad x_i^* - x_i^s \leq 0$$

$$(4.3d) \quad \lambda_i^* \frac{\partial L_i}{\partial \lambda_i} = \lambda_i^*(\epsilon_i^* - K_i) = 0, \quad \epsilon_i^* - K_i \leq 0$$

$$(4.3e) \quad x_i^* \geq 0, \quad \epsilon_i^* \geq 0, \quad \gamma_i^* \geq 0, \quad \lambda_i^* \geq 0$$

kaikilla $i = 1, \dots, \bar{i}$.

Koska kohdefunktio on konkaavi ja jatkuvasti derivoituva ja lisäksi määrittelyjoukko on konvekksi ja toteuttaa Slaterin ehdon, niin KKT-ehdot ovat sekä riittävät että välttämättömät ja ratkaisu on maksimi.

Kun päästörajoite on niukka, niin $\lambda_i^* > 0$. Varjohinta λ_i^* vastaa päästöjen vähentämisen rajakustannusta ja on siten yhtä suuri kuin päästöoikeuksien hinta paikallisilla hiilimarkkinoilla. Voidaan siis merkitä $p_i^e = \lambda_i^*$. Vastaavasti saadaan panoshinta $p_i^x = \gamma_i^*$.

Kun funktio f_i on aidosti konkaavi tai se toteuttaa yhtälöryhmän (3.9) eh-

dot, niin yhtälöryhmän (4.3) KKT-ehdot määrittävät yksikäsitteisen ratkaisun. Jälkimmäisessä tapauksessa voitto maksimoituu, kun $\epsilon_i^* = K_i$ ja $x_i^* = x_i^s$.

4.1.2 Linkittyneet järjestelmät

Tarkastellaan seuraavaksi linkittyntä tilannetta. Kun alueiden päästökaup-pajärjestelmät ovat linkittyneet, päästöoikeuksien kokonaismäärä on paikallisten päästökattojen summa ja ainoastaan tuotettujen päästöjen summa on rajoitettu. Nyt paikallinen päästökatto ei rajoita optimointia. Toisaalta voit-tofunktioon π_i on lisättävä päästöoikeuksien nettokokonaiskysynnän aiheut-tama kustannus, jolloin $\pi_i = p^y f_i(x_i, \epsilon_i) - p^\epsilon(\epsilon_i - K_i)$, jossa p^ϵ on päästöoikeuk-sien markkinahinta. Oletetaan, että hinta otetaan annettuna. Järjestelmien linkittyessä yhteinen markkinahinta p^ϵ määräytyy sellaiseksi, että hiilimark-kinat tyhjentävä ehto pätee (market clearing condition): $\sum_{i=1}^{\bar{i}} \epsilon_i = \sum_{i=1}^{\bar{i}} K_i$.

Alueen i voitonmaksimointiongelma voidaan muotoilla siis seuraavasti:

$$(4.4) \quad \max_{x_i, \epsilon_i} p^y f_i(x_i, \epsilon_i) - p^\epsilon(\epsilon_i - K_i) \quad \text{ehdolla } x_i = x_i^s, \quad \forall i = 1, \dots, \bar{i};$$

$$(4.5) \quad \text{kun lisäksi} \quad \sum_{i=1}^{\bar{i}} \epsilon_i = \sum_{i=1}^{\bar{i}} K_i.$$

Maksimointiongelma (4.4) voidaan muodostaa Lagrangen funktiot

$$(4.6) \quad L_i(x_i, \epsilon_i, \gamma_i) = p^y f_i(x_i, \epsilon_i) - p^\epsilon(\epsilon_i - K_i) - \gamma_i(x_i - x_i^s), \quad \forall i$$

kaikilla $i = 1, \dots, \bar{i}$. Ratkaisu saadaan yhdistämällä KKT-ehdot ja hiilimark-

kinat tyhjentävä ehto (4.5):

$$(4.7a) \quad \frac{\partial L_i}{\partial x_i} = p^y \frac{\partial f_i}{\partial x_i}(x_i^*, \epsilon_i^*) - \gamma_i^* \leq 0, \quad x_i^* \frac{\partial L_i}{\partial x_i} = 0$$

$$(4.7b) \quad \frac{\partial L_i}{\partial \epsilon_i} = p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^*, \epsilon_i^*) - p^\epsilon \leq 0, \quad \epsilon_i^* \frac{\partial L_i}{\partial \epsilon_i} = 0$$

$$(4.7c) \quad \gamma_i^* \frac{\partial L_i}{\partial \gamma_i} = \gamma_i^*(x_i^* - x_i^s) = 0, \quad x_i^* - x_i^s \leq 0$$

$$(4.7d) \quad x_i^* \geq 0, \quad \epsilon_i^* \geq 0, \quad \gamma_i^* \geq 0$$

$$(4.7e) \quad \sum_{i=1}^{\bar{i}} (\epsilon_i^* - K_i) = 0, \quad p^\epsilon \geq 0$$

kaikilla i . Koska kohdefunktio on konkaavi ja jatkuvasti derivoituva, niin ratkaisun ehdot (4.7) ovat sekä riittävät että välttämättömät ja ratkaisu on maksimi.

Jos lisäksi tuotantofunktio on aidosti konkaavi, niin ratkaisu on yksikäsitteinen.

Myös jos funktio f_i toteuttaa yhtälöryhmän (3.9) ehdot, niin ratkaisu on yksikäsitteinen. Tämän todistetaan liitteen B lauseessa 2.

Yleisemmässä tapauksessa, jos hinta $p^\epsilon = 0$, niin yhtälö (4.7e) ei ole välttämättä sitova ja kokonaispäästöt voivat olla alle päästökattojen summan.

Vertaillaan ratkaisun määrittäviä yhtälöryhmiä (4.3) ja (4.7) olettaen, että jokaisessa järjestelmässä päästöoikeuksia on niukasti eli yhtälöryhmässä (4.3) $\lambda_i > 0$ kaikilla i . Silloin myös rivin (4.7e) ensimmäinen ehto on sitova ja linkittynyt kokonaisuus on niukka. Tämä tarkoittaa, että linkittyminen ei vaikuta päästöihin ja päästöoikeuksien käyttö vastaa tuotettujen päästöjen määrää.

Jos ennen linkittymistä kaikkien järjestelmien päästörajoitteen varjohinta λ_i^* on yhtä suuri kuin linkittymisen jälkeinen päästöoikeuksien hinta, $\lambda_i^* = p^\epsilon$ kaikilla i , silloin yhtälöryhmät (4.3) ja (4.7) ovat ekvivalentit. Vertailu osoittaa, että niukat, paikalliset päästökauppajärjestelmät toimivat yhtä kustannustehokkaasti kuin linkittynyt järjestelmäkokonaisuus, jos ja vain jos $\lambda_i^* = p^\epsilon$ kaikilla i .

Kun $\lambda_i \neq p^\epsilon$ jollain i , niin silloin erilliset paikalliset järjestelmät ovat

linkittyneeseen kokonaisuuteen verrattuna joko enemmän tai vähemmän tehokkaita. Näistä ainoastaan jälkimmäinen on mahdollinen. Tämä voidaan osoitetaan näyttämällä, että yhtälöryhmä (4.7) ja sosiaalisen optimi (4.10) ovat ekvivalentit. Toisin sanoen, koska linkittynyt kokonaisuus on yhtä tehokas kuin mahdollisimman tehokas, vaihtoehtoiset tasapainot (kuten yhtälöryhmässä (4.3)) ovat välttämättä tehottomampia.

4.1.3 Sosiaalinen optimi

Sosiaalisen optimin löytämiseksi tarkastellaan maksimointiongelmaa, jossa pyritään valitsemaan tuotannontekijät x_i ja ϵ_i kaikilla i siten, että voittojen summa maksimoituu – edellyttäen, että yhteenlasketut päästöt eivät ylitä päästökattojen summaa. Toisin sanoen

$$(4.8) \quad \max_{\substack{x_1, \dots, x_{\bar{i}} \\ \epsilon_1, \dots, \epsilon_{\bar{i}}}} \sum_{i=1}^{\bar{i}} \pi_i(x_i, \epsilon_i) \quad \text{ehdoilla } x_i = x_i^s \quad \forall i \text{ ja } \sum_{i=1}^{\bar{i}} \epsilon_i \leq \sum_{i=1}^{\bar{i}} K_i.$$

Ratkaistaan tämä muodostamalla Lagrangen funktio

$$(4.9) \quad L(x, \epsilon, \gamma, \lambda) = p^y \sum_{i=1}^{\bar{i}} f_i(x_i, \epsilon_i) - \sum_{i=1}^{\bar{i}} \gamma_i (x_i - x_i^s) - \lambda \sum_{i=1}^{\bar{i}} (\epsilon_i - K_i),$$

jossa $x, \epsilon, \gamma \in \mathbb{R}^{\bar{i}}, \lambda \in \mathbb{R}$.

KKT-ehdoiksi saadaan, että

$$(4.10a) \quad \frac{\partial L}{\partial x_i} = p^y \frac{\partial f_i}{\partial x_i}(x_i^*, \epsilon_i^*) - \gamma_i \leq 0, \quad x_i^* \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0, \quad \forall i$$

$$(4.10b) \quad \frac{\partial L}{\partial \epsilon_i} = p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^*, \epsilon_i^*) - \lambda \leq 0, \quad \epsilon_i^* \frac{\partial L}{\partial \epsilon_i} = 0, \quad \forall i$$

$$(4.10c) \quad \gamma_i^* \frac{\partial L}{\partial \gamma_i} = \gamma_i^* (x_i^* - x_i^s) = 0, \quad x_i^* - x_i^s \leq 0, \quad \forall i$$

$$(4.10d) \quad \lambda \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \lambda \sum_{i=1}^{\bar{i}} (\epsilon_i^* - K_i) = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} \leq 0, \quad \lambda \geq 0$$

$$(4.10e) \quad x_i^* \geq 0, \quad \epsilon_i^* \geq 0, \quad \gamma_i^* \geq 0, \quad \forall i.$$

Tästä nähdään helposti, että yhtälöryhmät (4.7) ja (4.10) ovat yhtäpitäviä ja $p^e = \lambda$. Tämä osoittaa, että päästökauppajärjestelmien linkittäminen johtaa utilitaristisella hyvinvointifunktiolla mitattuna sosiaalisesti optimaaliseen tulokseen.

Toisaalta ehtojen (4.3), (4.7) ja (4.10) vertailu osoittaa, että paikalliset päästökauppajärjestelmät toimivat sosiaalisesti tehokkaasti, jos ja vain jos $\lambda_i = p^e$ kaikilla i . Tämä tarkoittaa, että linkittömän tilanteen epätehokkuus perustuu juuri päästöoikeuksien hintaeroihin: mitä suurempi ero hinnoissa, sitä epätehokkaampi tilanne on. Kun päästökauppajärjestelmät linkitetään, erillisten hiilimarkkinoiden välinen hintaero poistuu ja voittojen summa kasvaa. Tässä rajallisessa kontekstissa voidaan todeta, että linkittymisestä on hyötyä vain, jos linkittyvien järjestelmien hinnat poikkeavat toisistaan.³⁶

Jos lisäksi oletetaan paikalliset järjestelmät ovat niukkoja (yhtälöryhmässä (4.3) $\lambda_i > 0$ kaikilla i), silloin päästöjen kokonaismäärä $\sum_{i=1}^{\bar{i}} \epsilon_i$ ei muutu. Tässä tapauksessa voidaan sanoa, että linkittämällä päästökauppajärjestelmät ilmastopolitiikan kustannustehokkuus paranee, kun alkuperäinen ilmastovaikutus voidaan saavuttaa suuremmalla voittojen summalla.

4.1.4 Siirtyminen NL-järjestelmiin

UNFCCC:n puitteissa käytävien ilmastoneuvottelujen yhteydessä on keskusteltu joustomekanismien uudistamisesta. On ehdotettu, että Kioton pöytäkirjan määrittelemä CDM-krediittijärjestelmä uudistettaisiin siirtymällä ”no lose” -tavoitteisiin perustuviin krediittijärjestelmiin.

Seuraavassa tarkastellaan asetelmaa, jossa kiintiöjärjestelmään linkittynyt perinteinen krediittijärjestelmä korvataan NL-järjestelmällä. Tarkastellaan yksinkertaisuuden vuoksi kilpailullisilla markkinoilla toimivia edustavia yrityksiä. Krediittijärjestelmän yritys k ja kiintiöjärjestelmän yritys i myyvät tuotoksensa samoille markkinoille.³⁷ Tuotannontekijähinnat normalisoidaan tuotoshinnan suhteen, joten voidaan määritellä, että $p_k^y = p_i^y = 1$.

³⁶ Tässä ei huomioida esimerkiksi hiilimarkkinoiden likviditeetin paranemista tai monopolivoiman heikkenemistä.

³⁷ Tästä ei muodostu kaksoislaskentaongelmaa, sillä kukin yritys toimii vain yhdessä järjestelmässä.

Edellisessä alaluvussa nähtiin, että kohdan (3.9) mukaisilla tuotantofunktiolla panosten kysyntä ja tarjonta ovat yhtä suuret, kun ehdot (3.9) pätevät. Voidaan siis olettaa, että $x_k^s, x_i^s > 0$ sekä $x_k = x_k^s$ ja $x_i = x_i^s$.

Olkoon NL-järjestelmässä esimerkin (3.21) mukainen krediittifunktio. Tarkastelu on relevantti, kun krediittijärjestelmässä vallitsevilla säännöillä syntyy krediittejä. Oletetaan siis, että $(1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k \geq 0$, jolloin krediittifunktio voidaan kirjoittaa yksinkertaisemmin:

$$c_k(\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k) = (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k,$$

jossa parametri $\alpha \in [0, 1[$ määrittää järjestelmän ”no lose” -tavoitteen. Jos $\alpha = 0$, niin kyseessä on perinteinen krediittijärjestelmä, muuten kyseessä on NL-järjestelmä.

Olkoon järjestelmien välillä on rajoitettu linkki. Krediittien käytölle on asetettu päästökattoon suhteutettu rajoite $\rho > 0$. Esimerkiksi EU ETS:n ja CDM:n välisessä linkissä kansalliset jakosuunnitelmat³⁸ määrittävät, kuinka suuri määrä krediittejä sallitaan. Esimerkiksi Suomessa sallitaan Kioton pöytäkirjan mukaisia hankemekanismeja yhteensä 11,7 prosenttia suhteessa päästöoikeuksia kokonaismäärään (TEM 2006) eli $\rho = 11,7\%$.³⁹ Täsmällisemmin muotoiltuna rajoite on $c_k(\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k) \leq \rho K_i$. Tämän lisäksi päästöjen tuotantoa rajoittaa päästökaton ja tuotettujen krediittien kokonaismäärä. Kilpailullisilla markkinoilla päästöyksiköiden kysyntä on yhtä suuri tarjonta eli

$$(4.11) \quad \epsilon_i = K_i + c_k(\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k) = K_i + (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k.$$

Nyt yritysten voitonmaksimointiongelmat voidaan muotoilla siten, että

$$(4.12) \quad \max_{\epsilon_k} f_k(x_k^s, \epsilon_k) + p^\epsilon c_k(\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k) \quad \text{ehdolla } c_k(\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k) \leq \rho K_i \text{ ja}$$

$$(4.13) \quad \max_{\epsilon_i} f_i(x_i^s, \epsilon_i) - p^\epsilon(\epsilon_i - K_i).$$

³⁸ NAP, National Allocation Plan.

³⁹ Sallittuun osuuteen lasketaan myös muut Kioton pöytäkirjan määrittelemät krediitit.

Maksimointiongelmia (4.12) ja (4.13) vastaavat Lagrangen funktio:

$$L_k(\epsilon_k, \lambda) = f_k(x_k^s, \epsilon_k) + p^\epsilon [(1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k] - \lambda [(1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k - \rho K_i] \quad \text{ja}$$

$$L_i(\epsilon_i) = f_i(x_i^s, \epsilon_i) - p^\epsilon (\epsilon_i - K_i),$$

jossa $\lambda \geq 0$.

Markkinatasapaino voidaan ratkaista maksimointiongelmiä (4.12) ja (4.13) KTT-ehtojen sekä ehdon (4.11) avulla:

$$(4.14a) \quad \frac{\partial L_k}{\partial \epsilon_k} = \frac{\partial f_k}{\partial \epsilon_k}(x_k^s, \epsilon_k^*) - p^\epsilon + \lambda^* \leq 0, \quad \epsilon_k^* \frac{\partial L_k}{\partial \epsilon_k} = 0$$

$$(4.14b) \quad \frac{\partial L_i}{\partial \epsilon_i} = \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \epsilon_i^*) - p^\epsilon \leq 0, \quad \epsilon_i^* \frac{\partial L_i}{\partial \epsilon_i} = 0$$

$$(4.14c) \quad \lambda^* \frac{\partial L_k}{\partial \lambda} = \lambda^* [(1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k^* - \rho K_i] = 0$$

$$(4.14d) \quad (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k^* - \rho K_i \leq 0$$

$$(4.14e) \quad x_i^* \geq 0, \quad \epsilon_i^* \geq 0, \quad \lambda^* \geq 0$$

$$(4.14f) \quad \epsilon_i^* = K_i + (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \epsilon_k^*.$$

Tarkastellaan käytännön kannalta relevanttia tapausta: Oletetaan, että $\epsilon_k^* > 0$ ja $\epsilon_i^* > 0$. Nyt epäyhtälöistä (4.14a) ja (4.14b) saadaan, että

$$(4.15) \quad \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \epsilon_i^*) - p^\epsilon = 0 \quad \text{ja} \quad \frac{\partial f_k}{\partial \epsilon_k}(x_k^s, \epsilon_k^*) - p^\epsilon + \lambda^* = 0$$

ja edelleen

$$(4.16) \quad \lambda^* = \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \epsilon_i^*) - \frac{\partial f_k}{\partial \epsilon_k}(x_k^s, \epsilon_k^*).$$

Tästä nähdään, että päästöjen rajatuottavuudet ovat yhtä suuret eri järjestelmissä vain, jos $\lambda^* = 0$. Tämä tarkoittaa, että rajoite (4.14d) ei ole sitova eli krediittien käyttöä ei käytännössä rajoiteta. Jos $\lambda^* > 0$, niin rajoite (4.14d) sitoo ja rajatuottavuudet ovat erisuuret. Tämä tarkoittaa, että tuotantoa voitaisiin kasvattaa löysäämällä rajoitetta.

Tarkastellaan tapausta, jossa $\lambda^* > 0$. Yhtälöstä (4.14a) saadaan epäyhtälö

$$\underbrace{\frac{\partial f_k}{\partial \epsilon_k}(x_k^s, \epsilon_k^*)}_{\text{rajatulo}} = p^\epsilon - \lambda^* < \underbrace{p^\epsilon}_{\text{rajakustannus}},$$

eli krediittijärjestelmän näkökulmasta tasapainossa päästöjen lisäämisen rajatulo on pienempi kuin rajakustannus. Ilman rajoitetta krediittijärjestelmä tuottaisi siis vähemmän päästöjä eli lisäisi krediittien määrää.

Sijoittamalla yhtälöön (4.16) yhtälöt (4.14f) ja (4.14c) saadaan

$$(4.17) \quad \lambda^* = \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, (1 + \rho)K_i) - \frac{\partial f_k}{\partial \epsilon_k}(x_k^s, (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \rho K_i) > 0.$$

Oletetaan lisäksi, että funktio f_i täyttää ehdot (3.9). Derivoimalla yhtälö (4.17) parametrin α suhteen saadaan

$$\frac{\partial \lambda^*}{\partial \alpha} = -\frac{\partial^2 f_k}{\partial \epsilon_k^2}(x_k^s, (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \rho K_i)(-\hat{\epsilon}_k) = \frac{\partial^2 f_k}{\partial \epsilon_k^2}(x_k^s, (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \rho K_i)\hat{\epsilon}_k < 0,$$

mikä tarkoittaa, että λ^* pienenee, kun α suurenee.

Derivoimalla yhtälö (4.17) parametrin ρ suhteen saadaan

$$(4.18) \quad \frac{\partial \lambda^*}{\partial \rho} = \left(\frac{\partial^2 f_i}{\partial \epsilon_i^2}(x_i^s, (1 + \rho)K_i) + \frac{\partial^2 f_k}{\partial \epsilon_k^2}(x_k^s, (1 - \alpha)\hat{\epsilon}_k - \rho K_i) \right) K_i < 0,$$

joten λ^* pienenee, kun ρ suurenee.

Käytännössä tämä tarkoittaa, että järjestelmien välistä eroa päästöjen rajatuottavuuksissa voidaan supistaa kahdella tavalla. Yhtäältä tiukentamalla NL-tavoitetta eli kasvattamalla parametria α rajatuottavuusero pienenee. Toisaalta lisäämällä sallittua krediittien käyttömäärää eli kasvattamalla parametria ρ rajatuottavuuden lähestyvät toisiaan.

Edellä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää tarkastellessa tilannetta, jossa arvioidaan kustannustehokkuutta CDM-krediittijärjestelmän muuntamisesta NL-järjestelmäksi, kun kiintiöjärjestelmä kuten EU ETS on linkittynyt krediittijärjestelmään. Käytännössä EU ETS:n EUA-päästöoikeuksien jälkimarkkinahinnat ovat olleet vain hieman korkeampia kuin CDM:n CER-kre-

diittien markkinahinta (ks. Nord Pool (2009)). Lisäksi useiden arvioiden mukaan CDM järjestelmässä krediittien tuotantokustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat verrattuna niistä saatavaan myyntihintaan (esim. Green 2008).

Kun epäyhtälö (4.14d) on sitova, päästöyksiköiden markkinahinta ei määrydy yksikäsitteisesti. Tasapainossa kiintiöjärjestelmä on valmis ostamaan krediittejä hinnalla joka on enintään päästöjen rajatuottavuuden suuruinen eli $p^{\epsilon*} \leq \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}$. Toisaalta krediittijärjestelmä olisi valmis vähentämään päästöjään, jos tuotetuista krediiteistä saatava markkinahinta on vähintään yhtä suuri kuin päästöjen rajatuottavuus $p^{\epsilon*} \geq \frac{\partial f_k}{\partial \epsilon_k}$. Yhtälöistä (4.15) nähdään, että toteutuneen hinnan $p^{\epsilon*}$ on oltava välillä $[p^{\epsilon} - \lambda^*, p^{\epsilon}]$. Kun näin on, molemmat osapuolet hyötyvät kaupasta.

Edellisen perusteella voidaan tarkastelun yksinkertaisuuden vuoksi olettaa, että $p^{\epsilon*} = p^{\epsilon}$, eli CER-krediitit myydään EU ETS:n mukaisella päästöjen rajakustannushinnalla, ja että tasapainossa CDM-järjestelmän päästöjen rajatuottavuus on markkinahintaa pienempi, eli $\lambda^* > 0$. Näin CDM-järjestelmän toimijat keräävät jokaisesta CER-krediitistä parametrin λ^* suuruisen ylisuuren voiton (economic rent). Yhtälöstä (4.18) nähdään, että mitä tiukempi krediittirajoite (pienempi ρ) on, sitä suurempi on ylisuuri voitto. Kuitenkin tiukentamalla NL-tavoitetta eli suurentamalla parametria α voidaan ylisuurta voittoa pienentää. Perinteisissä krediittijärjestelmissä kuten CDM-järjestelmässä α on nolla. Siirtyminen NL-järjestelmään tarkoittaa, että α on suurempi, joten ylisuuri voitto on pienempi.

NL-tavoitteen α kasvattaminen ei vaikuta EUA-päästöoikeuksien markkinahintaan, kunhan λ^* säilyy positiivisena. Jos NL-tavoitteen asettaa liian suureksi, lopulta λ^* painuu nollaan ja rajoite (4.14d) ei ole enää sitova. Kun rajoite (4.14d) on sitova, siitä nähdään suoraan, että $\frac{\partial \epsilon_k^*}{\partial \alpha} = -\hat{\epsilon}_k < 0$, eli päästöt vähenevät NL-tavoitteen tiukentuessa. Toisaalta kiintiöjärjestelmän päästötaso ei riipu NL-tavoitteesta, sillä $\epsilon_i^* = (1 + \rho)K_i$ ja $\frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial \alpha} = 0$.

Tämä tarkastelu osoittaa kansainvälisten ilmastoneuvottelujen kannalta merkittävän tuloksen: Jos krediittien käyttöä on rajoitettu sitovasti ja krediittien hinta määräytyy kiintiöjärjestelmän rajakustannusten mukaan, niin siirtymällä NL-järjestelmään voidaan vähentää kokonaispäästöjä ilman pääs-

töoikeuksien markkinahinnan nousua tai ilmastopolitiikan kustannusten kasvua. Krediittien tuottaminen säilyy yhä taloudellisesti kannattavana, vaikkakin krediittijärjestelmästä saatu voitto pienenee.

4.1.5 Hinta- ja kokoero

Jos markkinat toimivat täydellisesti, hintaero poistuu järjestelmien linkityessä: Kalliimman järjestelmän hinta laskee ja halvemman järjestelmän hinta nousee. Lopullinen hinta riippuu pitkälti järjestelmien kokoeroista. Pienen järjestelmän hinta muuttuu enemmän kuin suuren. Nykyisten päästökauppajärjestelmien kokoerot ovat melko huomattavia. Esimerkiksi vuonna 2007 EU ETS:n päästöoikeuksien kokonaisarvo oli noin 50 miljardia dollaria, kun toiseksi suurimman NSW:n arvo oli noin 0,2 miljardia dollaria (WB 2008, 17).

Tarkastellaan kahta eri kokoista talousaluetta, joilla on kokoon suhteutettuna identtiset päästökauppajärjestelmät. Olkoon siis $x_1^s, x_2^s, K_1, K_2 > 0$ vakioita ja merkitään $x_1^s = x^s$ ja $x_2^s = \alpha x^s$ sekä $K_1 = K$ ja $K_2 = \alpha K$, jossa $\alpha \in]0, 1]$. Kun $0 < \alpha < 1$, niin $x_1^s > x_2^s$ ja $K_1 > K_2$, eli talousalue 1 on suurempi. Jos $\alpha = 1$, niin talousalueet ovat samankokoiset. Olkoon lisäksi $p_1^\epsilon, p_2^\epsilon > 0$ sekä $p^y = 1$. Oletetaan, että kaikki panokset käytetään, eli $x_1^* = x_1^s$ ja $x_2^* = x_2^s$.

Olkoon talousalueita edustavilla yrityksillä ehtojen (3.9) mukaiset tuotantofunktiot siten, että päästöjen rajatuottavuudet ovat erisuuruiset. Merkitään $\frac{\partial}{\partial \epsilon} f_1(x, \epsilon) = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x, \epsilon)$ ja $\frac{\partial}{\partial \epsilon} f_2(x, \epsilon) = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x, \beta \epsilon)$ kaikilla $x, \epsilon \in \mathbb{R}_+$, jossa $\beta > 0$. Jos $\beta \in]0, 1[$, niin järjestelmällä 2 on korkeampi päästöjen rajatuottavuus annetulla päästötasolla, eli järjestelmällä 1 on ympäristöystävällisempi tuotantoteknologia. Jos $\beta > 1$, niin järjestelmällä 1 on korkeampi päästöjen rajatuottavuus, eli järjestelmällä 2 on ympäristöystävällisempi tuotantoteknologia. Kun $\beta = 1$, niin päästöjen rajatuottavuudet ovat yhtä suuret.

Kun järjestelmät eivät ole linkittyneet, ehdoista (4.3) saadaan päästöoikeuksien paikalliset markkinahinnat $p_1^\epsilon = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, K)$ ja $p_2^\epsilon = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(\alpha x^s, \alpha \beta K)$. Koska tuotantofunktio on lineaarisesti homogeeninen, niin rajatuottavuus on

nollannen asteen homogeeninen funktio, joten $\frac{\partial}{\partial \epsilon} f(\alpha x^s, \alpha \beta K) = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, \beta K)$.
Nyt, jos $\beta > 1$, niin

$$(4.19) \quad p_1^\epsilon = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, K) > \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, \beta K) = p_2^\epsilon,$$

koska $\frac{\partial^2 f}{\partial \epsilon^2} < 0$. Jos taas $\beta \in]0, 1[$, niin $p_1^\epsilon < p_2^\epsilon$.

Oletetaan, että päästöoikeuksia on niukasti ja $\epsilon_1^*, \epsilon_2^* > 0$. Kun järjestelmät linkitetään, saadaan ratkaisun ehdoiksi

$$(4.20) \quad \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, \epsilon_1^*) = p^\epsilon = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(\alpha x^s, \beta \epsilon_2^*) \quad \text{ja}$$

$$(4.21) \quad \epsilon_1^* + \epsilon_2^* = K + \alpha K = (1 + \alpha)K.$$

Koska tuotantofunktio on lineaarisesti homogeeninen, niin rajatuottavuus on nollannen asteen homogeeninen, siksi yhtälö (4.20) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, \epsilon_1^*) = \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(x^s, \frac{\beta}{\alpha} \epsilon_2^*).$$

Koska rajatuottavuusfunktio on aidosti monotoninen, tästä nähdään, että $\epsilon_1^* = \frac{\beta}{\alpha} \epsilon_2^*$ ja $\epsilon_2^* = \frac{\alpha}{\beta} \epsilon_1^*$. Kun nämä sijoitetaan yhtälöön (4.21) ja järjestellään uudelleen, saadaan ratkaisuksi

$$(4.22) \quad \epsilon_1^* = \frac{\beta(1 + \alpha)}{\alpha + \beta} K \quad \text{ja} \quad \epsilon_2^* = \frac{\alpha(1 + \alpha)}{\alpha + \beta} K.$$

Kun $\beta = 1$, eli tuotantofunktiot ovat samat molemmissa järjestelmissä, niin $\epsilon_1^* = K$ ja $\epsilon_2^* = \alpha K$ kuten ennen linkkiä. Jos pienemmässä järjestelmässä päästöjen rajatuottavuus on matalampi eli $\beta > 1$, niin $\epsilon_1^* > K$ ja $\epsilon_2^* < \alpha K$, eli linkin avulla päästöoikeuksia siirtyy suureen korkean rajatuottavuuden

maahan.⁴⁰ Koska

$$(4.23) \quad \lim_{\alpha \rightarrow 0} \epsilon_1^* = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\beta(1 + \alpha)}{\alpha + \beta} K = K,$$

niin yhtälöiden (4.19) ja (4.20) perusteella myös $p^\epsilon < p_1^\epsilon$ ja $p^\epsilon \rightarrow p_1^\epsilon$, kun $\alpha \rightarrow 0$. Tämä tarkoittaa, että jos matalan rajatuottavuuden maa on pieni, myös suuren maan kokema päästöoikeuksien hinnan lasku on pieni.

Vastaavasti, jos pienemmässä järjestelmässä päästöjen rajatuottavuus on korkeampi eli $\beta < 1$, niin $\epsilon_1^* < K$ ja $\epsilon_2^* > \alpha K$.⁴¹ Yhtälöiden (4.23), (4.19) ja (4.20) perusteella myös $p^\epsilon > p_1^\epsilon$ ja $p^\epsilon \rightarrow p_1^\epsilon$, kun $\alpha \rightarrow 0$. Siis, mitä pienempi korkean rajatuottavuuden maa on, sitä pienempi on suuren maan kokema päästöoikeuksien hinnan nousu.

Tarkastelu osoittaa, että linkittymisen hyöty on riippuu linkittyvien kiintiöjärjestelmien kokoerosta. Linkittymisen jälkeinen päästöoikeuksien markkinahinta määräytyy suuremmaksi osaksi suuremman järjestelmän linkittymistä edeltäneen markkinahinnan mukaan. Mitä suurempi kokoero on, sitä vahvemmin suuri järjestelmä määrittää uuden markkinahinnan. Koska suuren järjestelmän hinta muuttuu vain vähän, myös linkittymisen hyöty suuremmalle järjestelmälle on pieni. Puolestaan pieni järjestelmä kokee suuren hinnan muutoksen, joten vaikutus kustannustehokkuuteen saattaa olla merkittävä.

Tämä ominaisuus on merkittävä arvioitaessa esimerkiksi EU ETS:n saamaa hyötyä linkittymisestä. Ensinnäkin EU ETS on toiminnassa olevista päästökauppajärjestelmistä ylivoimaisesti suurin, joten varteen otettavia linkittymiskumppaneita on vain vähän. Linkittyminen muodostanee merkittävän keinon parantaa kustannustehokkuutta vasta lähitulevaisuudessa, kun suunnitteilla olevat päästökauppajärjestelmän astuvat voimaan. Toiseksi ha-

⁴⁰ Lopputulos voidaan johtaa oletuksesta:

$$\begin{aligned} \beta > 1 &\Leftrightarrow \alpha\beta > \alpha \Leftrightarrow \alpha\beta + \beta > \alpha + \beta \\ &\Leftrightarrow \frac{\beta(1 + \alpha)}{\alpha + \beta} > 1 \Leftrightarrow \epsilon_1^* = \frac{\beta(1 + \alpha)}{\alpha + \beta} K > K. \end{aligned}$$

Toinen epäyhtälö saadaan sijoittamalla edellinen yhtälöön (4.21).

⁴¹ Tämä voidaan osoittaa kuten edellä.

vainto kokoeron vaikutuksesta tarjoaa merkittävän tuloksen myöhemmin, kun tarkastellaan pienen järjestelmän kannustinta luoda uusia päästöoikeuksia. Pieni järjestelmä ei juuri vaikuta linkittyneen kokonaisuuden markkinahintaan, mutta jos se voi luoda päästöoikeuksia rajatta, niin se voi kerätä seigniorage-tuloja linkittymiskumppaneiden kustannuksella (ks. alaluku 4.6.2).

4.1.6 Tehokkuus käytännössä

Todellisuudessa päästöoikeuksien hinta (ja siten myös järjestelmien välinen hintaero) riippuu myös tekijöistä, jotka eivät heijasta päästöjen vähentämisen rajakustannuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi lainsäädännössä määritellyt sanktiot (compliance provisions), energian hinta, varaventtiilimekanismit ja toimijoiden käsitys omista mahdollisuuksistaan vähentää päästöjä. (WB 2008, 24). Tällaisista tekijöistä johtuva hintaero ei siis viittaa eroihin päästövähennysten rajakustannuksissa, joten hintaeron poistuminen ei välttämättä johda tehokkuuden paranemiseen.

Staattinen kustannustehokkuus pelkistyy hinnan muutoksiin, mutta myös myöhemmin käsiteltävät vaikutukset heijastuvat hintaan eräänlaisina takaisinkytkentöinä. Esimerkiksi linkittymisen mahdollisesti aiheuttama muutos kokonaispäästöissä vaatii päästötavoitteiden uudelleentarkistusta. Jos vuotaneesta tavoitteesta halutaan pitää kiinni, päästökattoa joudutaan tiukentamaan, mikä lisää kustannuksia ja heikentää tehokkuutta. Toisin sanoen lisäpäästö on lisäkustannus – juurikin päästökauppajärjestelmän ansiosta.

Yrityksen teoria tarjoaa myös toisen näkökulman linkittymisen tehokkuusvaikutukseen. Kun yritykset toimivat epätäydellisillä markkinoilla, ne voivat vaikuttaa päästöoikeuksien hintaan (esim. Godby 2002). Hahn (1984) osoittaa analyttisesti, että epätäydellisillä markkinoilla yrityksen markkinavoima (monopolivoima) kasvaa, kun alkujakoa suurennetaan. Kun yrityksellä on markkinavoimaa, päästövähennysten lisääminen vähentää vapautuneista päästöoikeuksien saatua hintaa. Toisin sanoen monopolin tekemä investointi osaltaan laskee siitä saatavia tuottoja (eli vapautuvien päästöoikeuksien arvoa), jolloin päästöjen vähentämisen kannustin on pienempi. Linkittyminen

laajentaa markkinoita ja heikentää yksittäisten yritysten markkinavoimaa, mikä laskee päästökaupan kustannuksia.

4.2 Distribuutio

Linkittyminen aiheuttamat vaikutukset jakautuvat epätasaisesti päästökaupparjestelmien toimijoiden ja itse järjestelmien kesken. Toisten toimijoiden ja järjestelmien osalta päästökaupan kustannukset kasvavat, toisten kustannukset pienenevät. Vaikutusten voimakkuus riippuu ensisijaisesti hintaerosta ja alkujasta.

4.2.1 Yksittäisen yrityksen tapaus

Tarkastellaan, miten järjestelmän i yrityksen j voitto π_{ij} muuttuu, kun päästöoikeuksien hinta muuttuu linkittymisen seurauksena. Kun yrityksen maksimointiongelmaan on yksikäsitteinen ratkaisu, niin Hotellingin lemmän (ks. esim. Mas-Colell et al. 1995, 138-139) nojalla saadaan

$$(4.24) \quad \frac{\partial \pi_{ij}^*(p_{ij}^y, p^x, p_i^\epsilon)}{\partial p_i^\epsilon} = -(\epsilon_{ij}^*(p_{ij}^y, p^x, p_i^\epsilon) - \omega_{ij}).$$

Nyt siis $\frac{\partial \pi_{ij}^*}{\partial p_i^\epsilon} > 0$ jos ja vain jos $\omega_{ij} > \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon)$. Toisin sanoen voitto muuttuu samaan suuntaan kuin hinta, jos yritys on päästöoikeuksien nettomyyjä. Kun $\omega_{ij} < \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon)$, niin yritys on netto-ostaja ja hinnannousu laskee voittoa.

Yhtälöstä (4.24) nähdään, että linkittymisestä hyötyvät kalliimman järjestelmän ($p_i^\epsilon > p^\epsilon$) päästöoikeuksien ja niistä riippuvien tuotteiden netto-ostajat, sillä he voivat ostaa päästöoikeutensa aiempaa halvemmalla. Samoin halvemman järjestelmän ($p_i^\epsilon < p^\epsilon$) nettomyyjät hyötyvät, sillä heidän myymiensä tuotteiden (eli päästövähennysten) arvo nousee ja heille tarjoutuu uusia tuottavia investointimahdollisuuksia. (Ks. myös Jaffe ja Stavins 2007, 31; Haites 2001, 6; Blyth & Bosi 2004, 9–10; Haites ja Wang 2006, 4.)

Vastaavasti nähdään, että häviäjiä ovat kalliimman järjestelmän nettomyyjät ja halvemman järjestelmän netto-ostajat. Ensimmäiset menettävät markkinoitaan halvemman järjestelmän nettomyyjille. Jälkimmäiset joutu-

vat maksamaan päästöoikeuksista aiempaa kovemman hinnan. (Ks. myös Jaffe ja Stavins 2007, 31; Haites 2001, 6; Blyth & Bosi 2004, 9–10; Haites ja Wang 2006, 4.)

On syytä huomata, että Hotellingin lemma ja yhtälö (4.24) pätevät ainoastaan riittävän pienillä hinnanmuutoksilla. Jos muutos on riittävän suuri, myös kalliin järjestelmän nettomyyjät tai halvemman järjestelmän netto-ostajat voivat päätyä hyötymään linkistä. Jos hinta laskee riittävästi, kalliin järjestelmän nettomyyjästä tulee netto-ostajia, jonka jälkeen hinnanlasku vaikutus kääntyy positiiviseksi. Vastaavasti halvemman järjestelmän netto-ostajasta saattaa tulla nettomyyjä, jos hinta nousee riittävästi.

Tätä voidaan tarkastella analyttisesti (täsmällisen todistuksen tarjoaa liitteen B lause 1). Huomataan aluksi, että tuotantofunktion ominaisuuksista (3.9) seuraa, että

$$\lim_{p^\epsilon \rightarrow 0} \epsilon_{ij}^*(p^\epsilon) = \infty \quad \text{ja} \quad \lim_{p^\epsilon \rightarrow \infty} \epsilon_{ij}^*(p^\epsilon) = 0.$$

Olkoon yritys j kalliin järjestelmän nettomyyjä eli sille pätee $\omega_{ij} - \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon) > 0$. Nyt Bolzanon lausetta apuna käyttäen nähdään, että on olemassa sellainen $p^\epsilon < p_i^\epsilon$, että $\omega_{ij} - \epsilon_{ij}^*(p^\epsilon) = 0$ eli $\frac{\partial \pi_{ij}^*}{\partial p_i^\epsilon} = 0$. Käytännössä tämä tarkoittaa, että voiton muutoksen suunta kääntyy tässä pisteessä. Tätä pienemmällä hinnalla p^ϵ yritys on netto-ostaja, jolle $\frac{\partial \pi_{ij}^*}{\partial p_i^\epsilon} < 0$.

Vastaavasti, jos yritys j on halvan järjestelmän netto-ostaja, pätee $\omega_{ij} - \epsilon_{ij}^*(p_i^\epsilon) < 0$. Kuten edellä, on olemassa sellainen $p^\epsilon > p_i^\epsilon$, että $\omega_{ij} - \epsilon_{ij}^*(p^\epsilon) = 0$ eli $\frac{\partial \pi_{ij}^*}{\partial p_i^\epsilon} = 0$. Jos hinta nousee vielä tästä, yrityksen voitto kääntyy kasvuun.

On hyvä huomata, että edellinen päättely ei riitä osoittamaan, että riittävän suurella päästökauppajärjestelmien hinnanhintaerolla kaikki toimijat hyötyisivät linkittymisestä.

4.2.2 Päästökauppajärjestelmän tapaus ja pääomavirta

Päästökauppajärjestelmien tapauksessa Hotellingin lemma voidaan muotoilla siten, että päästökauppajärjestelmän i voiton osittaisderivaatta hinnan

suhteen on

$$(4.25) \quad \frac{\partial \pi_i^*(p^y, p^x, p_i^\epsilon)}{\partial p_i^\epsilon} = -(\epsilon_i^*(p^y, p^x, p_i^\epsilon) - K_i).$$

Jos päästökatto on sitova, ennen linkittymistä päästöjen määrä on yhtä suuri kuin päästökatto eli $\epsilon_i^*(p_i^\epsilon) - K_i = 0$. Tästä seuraa, että linkittymisen aiheuttama hinnanmuutos kasvattaa voittoa riippumatta muutoksen suunnasta.

Tämän voi havainnollistaa seuraavasti: Halvemmassa järjestelmässä hinta nousee, joten $\epsilon_i^*(p_i^\epsilon)$ laskee. Nyt yhtälöstä (4.25) nähdään, että $\frac{\partial \pi_i^*}{\partial p_i^\epsilon} > 0$ eli hinnan nousun vaikutus voittoon on positiivinen. Vastaavasti kalliissa järjestelmässä hinta laskee, joten $\epsilon_i^*(p_i^\epsilon)$ nousee. Nyt yhtälöstä (4.25) nähdään, että $\frac{\partial \pi_i^*}{\partial p_i^\epsilon} < 0$ eli hinnan lasku kasvattaa voittoa.⁴²

Käytännössä tästä seuraa tärkeä tulos: molemmat päästökauppajärjestelmät kokonaisuutena hyötyvät linkistä.

Linkin aiheuttaman kustannusmuutoksen voi käytännössä tulkita seuraavasti: Halvassa järjestelmässä hinnannousu vähentää päästöjä ja kasvattaa päästövähennyksistä aiheutuneita kustannuksia, mutta toisaalta halpa järjestelmä saa tuloja myydyistä päästöoikeuksista. Kalliissa järjestelmässä hinta laskee, jolloin tuotanto kasvaa päästöjen lisääntyessä, mutta toisaalta lisäpäästöjen vaatimat päästöoikeudet joudutaan ostamaan ulkopuolelta.

Analyttisemmin ilmaistuna, kun päästöoikeuksien hinta muuttuu, niin järjestelmien päästöoikeuksien nettokysyntä on nolasta poikkeava. Silloin päästöoikeuksien netto-tuontia $K_i - \epsilon_i^*(p^\epsilon) > 0$ vastaa pääomavirta $p^\epsilon(K_i - \epsilon_i^*(p^\epsilon))$. Pääomavirta on sitä suurempi, mitä suurempi on hintaero ennen linkittymistä.

4.2.3 Alkujaon ja päästökaton vaikutus distribuutioon

Osaltaan linkin distribuutiovaikutus riippuu järjestelmän päästöoikeuksien alkujaosta eli siitä, paljonko päästöoikeuksia jaetaan ilmaiseksi suhteessa huutokaupattuihin päästöoikeuksiin. Kiintiöjärjestelmän päästöoikeuksien net-

⁴² Teknisesti tämä on helpompi nähdä, kun huomataan, että hinta p_i^ϵ on maksimointiongelmassa Lagrangen kerroin ja epäyhtälörajoitteisen optimointiongelman ratkaisu on Lagrangen funktion satulapiste.

toimyyjät ja -ostajat valikoituvat, kun päästöoikeuksia jaetaan yrityksille. Kuten aiemmin todettiin se, hyötykö vai kärsikö toimija linkittymisestä, riippuu siitä, onko toimija päästöoikeuksien ostaja vai myyjä ja onko toimija halvempien vai kalliimpien päästöoikeuksien järjestelmässä. Jos yritys ei saa ilmaisia päästöoikeuksia ollenkaan ($\omega_{ij} = 0$), se joutuu ostamaan kaikki tarvitsemansa päästöoikeudet. Tällainen yritys on väistämättä netto-ostaja. Jos yritys saa päästöoikeuksia yli tarpeittensa ($\epsilon_{ij}^* < \omega_{ij}$), se on väistämättä netto-myyjä. (Ks. myös Jaffe ja Stavins 2007, 36–37.)

Koska päästöoikeuksien hinnat riippuvat pääasiassa päästövähennysmahdollisuuksien kustannuksista sekä päästötavoitteen tiukkuudesta, voi linkittymisestä aiheutuva pääomavirta olla poliittisesti hankala, jos sen nähdään aiheutuvan päästötavoitteiden löysyydestä halvempien päästöoikeuksien järjestelmässä. Esimerkiksi EU ETS-järjestelmän linkittyminen yhdysvaltalaisiin järjestelmiin voisi olla hankalaa tällaisen pääomavuodon takia. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 30–31.) On oletettavaa, että yhdysvaltalaisen järjestelmän päästöoikeudet olisivat halvempia, joten linkittyminen siirtäisi investointeja Euroopasta Yhdysvaltoihin.

Jos linkittyvässä kiintiöjärjestelmissä sovelletaan suhteellista tai dynaamista päästökattoa, syntyy varsin ongelmallinen tilanne. Järjestelmässä, jossa on suhteellinen päästökatto, päästöoikeuksien määrä lisääntyy talouskasvun (tai vastaavan indikaattorin) myötä. Kun tällainen järjestelmä linkittyy, suhteellisen päästökaton vaikutus päästöoikeuksien kokonaisarvoon muuttuu. Suhteellisen päästökaton synnyttämät uudet päästöoikeudet kasvattavat järjestelmän varallisuutta, kun se voi kerätä lisätuloja myymällä uudet päästöoikeudet. EU päästökauppajärjestelmää ei aiota linkittää tällaisiin kiintiöjärjestelmiin (EU 2008, 10).

Linkittyminen kiintiöjärjestelmien välillä vaikuttaa sekä pääoma- että hiilivuotoon⁴³ ja vaikutus kasvaa hintaeron kasvaessa. Järjestelmässä, jos-

⁴³ Tässä hiilivuodolla tarkoitetaan ensisijaisesti päästökauppajärjestelmien taipumukseen kasvattaa antropogeenisia kasvihuonekaasupäästöjä järjestelmän ulkopuolella. Esimerkiksi IPCC (2007, 12) arvioi, että Kioton pöytäkirjan päästövähennykset aiheuttaisivat noin 5–20 % päästölisäyksen jäsenmaiden ulkopuolella. Toisinaan keskustelussa ja kirjallisuudessa hiilivuodolla viitataan myös markkinaosuuksien ja tuotantopääoman siirtymiseen järjestelmän ulkopuolelle. Vaikka näillä ilmiöillä on runsaasti yhtymäkohtia, on ne toisinaan syytä erottaa käsitteellisesti. Jatkossa pääoman siirtymisestä puhutaan pää-

sa hinta on korkeampi, pääomavuodolla on taipumus pienentyä, mutta toisaalta järjestelmässä, jossa hinta on alhaisempi, pääomavuoto lisääntyy hinnan noustessa. Riippuen pääomavuodon nettomuutoksesta kokonaispäästöt voivat joko pienentyä tai kasvaa; tämä puolestaan riippuu pääomaliikkeiden hintaherkkyydestä. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 30.)

Linkittyvien järjestelmien välisestä hiili- ja pääomavuodosta on vielä todettava, että vaikka ilmastomuutoksen kannalta ei ole merkitystä sillä, missä päästöt tai päästövähennykset tuotetaan, kuitenkin päästövähennysprojekteilla ja -investoinneilla on myös paikallisia vaikutuksia, jotka tulee huomioida. Ensinnäkin on ilmeistä, että investoinnit ovat positiivinen shokki paikalliseen talouteen. Toiseksi kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksen yhteydessä myös muut paikallisesti vaikuttavat päästöt vähenevät. Kolmanneksi päästövähennyshankkeet kehittävät paikallista osaamista ja muita valmiuksia päästövähennysten kustannustehokkaalle toteutukselle.

4.3 Kilpailukyky

Päästökauppajärjestelmien vaikutus yritysten ja kansantalouden kilpailukykyyn on ollut keskeinen huolenaihe ilmastopoliittisessa keskustelussa. Seuraavassa rajaudutaan tarkastelemaan sitä, miten linkittyminen vaikuttaa päästökauppajärjestelmien kilpailukykyvaikutukseen. Tässä siis käsitellään kilpailukykyä erityisesti linkittymisen kontekstissa, ja tarkastelun ulkopuolelle rajataan kysymys siitä, miten päästökauppajärjestelmät vaikuttavat kilpailukykyyn yleisesti.

Tässä yrityksen kilpailukyvyllä tarkoitetaan yksinkertaisesti yrityksen kykyä kilpailla markkina-alueesta tuotosmarkkinoilla. Maiden ja talousalueiden tapauksessa kilpailukyky voidaan tulkita siten, että päästökaupan kokonaiskustannukset eivät merkittävästi heikennä kokonaistuotannon tasoa suhteessa muihin maihin.

Tarkastellaan kiintiöjärjestelmässä i yritystä j , jonka tuotantofunktio f_{ij} toteuttaa ehdot (3.9). Oletetaan, että järjestelmän päästökatto on sitova,

omavuotona ja hiilivuodon käsite varataan käytettäväksi nimenomaan kasvihuonekaasujen yhteydessä.

jolloin ratkaisuehdoista

$$\frac{\partial}{\partial \epsilon_i} f_{ij}(x_{ij}^*, \epsilon_{ij}^*) - p_i^\epsilon = 0.$$

Kun tästä otetaan kokonaisdifferentiaali, saadaan

$$\frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial \epsilon_i^2} d\epsilon_{ij}^* - dp_i^\epsilon = 0,$$

joka voidaan järjestellä siten, että

$$(4.26) \quad \frac{d\epsilon_{ij}^*}{dp_i^\epsilon} = \left(\frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial \epsilon_i^2} \right)^{-1} < 0.$$

Nyt voidaan tarkastella, miten tuotannon määrä muuttuu, kun päästöoikeuksien hinta muuttuu. Yhtälöstä (4.26) nähdään, että

$$(4.27) \quad \frac{dy_{ij}^*}{dp_i^\epsilon} = \frac{df_{ij}(x_{ij}^*, \epsilon_{ij}^*)}{dp_i^\epsilon} = \underbrace{\frac{\partial f_{ij}}{\partial x_{ij}} \frac{dx_{ij}^*}{dp_i^\epsilon}}_{=0} + \underbrace{\frac{\partial f_{ij}}{\partial \epsilon_{ij}}}_{>0} \underbrace{\frac{d\epsilon_{ij}^*}{dp_i^\epsilon}}_{<0} < 0,$$

eli tuotoksen määrä laskee, kun päästöoikeuksien hinta kasvaa. Edellinen päättely pätee myös tarkasteltaessa järjestelmää kokonaisuutena.

Kun eri järjestelmissä toimivat yritykset ovat muilta osin identtiset, päästökaupasta aiheutuva kilpailukykyero yritysten välinen perustuu päästöoikeuksien hintaan. Kilpailukyky heikkenee hinnan kasvaessa. Ero kilpailukyvyssä pienenee hintaeron kaventuessa: koska linkittyminen poistaa hintaeron, linkittyminen poistaa myös kilpailukykyeron eri järjestelmissä toimivien yritysten väliltä.

Tästä seuraa välittömästi, että päästökauppajärjestelmän tiukkuus (eli se, kuinka paljon päästöoikeuksia kokonaisuudessa jaetaan) ei vaikuta kilpailukykyyn linkittymisen jälkeen – vaikkakin tiukkuuden samankaltaisuus on muista syistä linkittymisen poliittinen ennakkoehto. Linkittyneillä hiili-markkinoilla päästöoikeuksien hinta on sama kaikille, siksi päästöoikeuksien määrän lisääminen muuttaa hintaa kaikkien osalta.

On kuitenkin syytä korostaa, että linkittyminen heikentää kilpailukykyä

niiden yritysten osalta, jotka joutuvat maksamaan päästöoikeuksistaan aiempaa korkeamman hinnan. Halvemmassa järjestelmässä toimivien yritysten kilpailukyky heikkenee linkittymisen aikaansaaman hinnan nousun seurauksena. Myös kilpailukyvyn suhteen linkittyminen luo voittajia ja häviäjiä.

Kilpailukykyvaikutusten tarkastelu monimutkaistuu, kun otetaan huomioon päästökauppajärjestelmien rakenteelliset erot. Keskeisinä tekijöinä ovat kiintiöjärjestelmien kattavuus ja päästöoikeuksien alkujako.

4.3.1 Kattavuus

Kiintiöjärjestelmät eroavat toisistaan kattamiensa sektorien ja kasvihuonekaasujen suhteen. Esimerkiksi EU ETS:iin osallistuvat sektorit kattavat alle puolet kaikista päästöistä, kun taas Australian NSW-järjestelmä kattaa vain sähkön myyjät. Puolestaan kasvihuonekaasuista EU ETS kattaa vain hiilidioksidin (sisältäen päästökauppajärjestelmän toisessa vaiheessa mahdollisuuden huomioida myös muita kaasuja), kun taas NSW- ja CCE-järjestelmät kattavat kuusi merkittävintä kasvihuonekaasua (Ellis ja Tirpak 2006, 11–12).

Vaikka erot järjestelmien kattavuudessa eivät estä linkittymistä, ne kuitenkin vaikuttavat linkittymisen potentiaaliin hyötyihin. Linkki lieventää päästöoikeuksien hintaeron aiheuttamaa kilpailukyvyn vääristymää vain aloilla, jotka ovat mukana molemmissa järjestelmissä. Sen sijaan sektoreilla, jotka ovat mukana vain toisessa järjestelmässä, päästöoikeuksien hinnan muutos saattaa pahentaa kilpailukyvyn vääristymiä entisestään: Toimijat, jotka eivät osallistu päästökauppaan, eivät maksa päästöistään hintaa. Jos toisessa järjestelmässä vastaavan alan yritykset osallistuvat päästökauppaan ja hinta nousee, kilpailukyvyn vääristymä kasvaa. Linkittymisestä sopiminen saattaa hankaloitua, jos linkittymisen aiheuttama muutos kilpailukyvyssä tulkitaan kiintiöjärjestelmien kattavuuseron aiheuttamaksi vääristymäksi. (Jaffe ja Stavins 2007, 31–32; Ellis ja Tirpak 2006, 23–24.)

4.3.2 Alkujako

Teoriassa alkujakometodi erilaisuus (eli jaetaanko päästöoikeudet ilmaiseksi vai huutokaupalla) ei vaikuta merkittävästi eri järjestelmissä toimivien yritys-

ten keskinäiseen kilpailukykyyn ennen ja jälkeen linkittymisen, olettaen, että yritykset eivät voi vaikuttaa ilmaisjaossa saatujen päästöoikeuksien määrään tai hintaan. Kun ilmaisjaossa saatujen päästöoikeuksien määrä on riippumaton yrityksen tuotannostasosta, yritykset joutuvat tulkitsemaan ilmaisjaon könttäsumatukena (lump sum subsidy). Tällainen tuki ei vaikuta yritysten rajakustannuksiin eikä tuotannon määrä muutu. (Hahn 1984; Jaffe ja Stavins 2007, 37) Alkujakometodista riippumatta yritykset kohtaavat päästöoikeuksien kustannukset joko suoraan tai vaihtoehtoiskustannuksina.

Sen sijaan huutokauppaa painottava alkujako näkyy yritysten taseissa heikentyneenä omavaraisuusasteena. Kun ilmaisjakoa ei ole, yritykset joutuvat keräämään rahoituksen päästöoikeuksien ostoon, mikä saattaa välillisesti vaikuttaa yritysten toimintakykyyn. Toisaalta ilmaisjaon lisääminen kasvattaa yritysten monopolivoimaa (Hahn 1984).

Tässä on syytä korostaa, että alkujakometodien erilaisuudella ei ole oleellista merkitystä linkittymisen kilpailukykyvaikutuksen kannalta. Vaikka alkujako on kriittinen tekijä päästökauppajärjestelmien kilpailukykyvaikutuksille yleisesti, tämä alkujaon ja kilpailukyvyn välinen problematiikka ei juuri muutu linkittymisen yhteydessä. Siksi tämä aspekti voidaan rajata tarkastelun ulkopuolelle.

Jos yritysten toiminta vaikuttaa ilmaisjaon määrään, kilpailukyky muuttuu. Näin saattaa käydä esimerkiksi, kun ilmaisjaon määrää päivitetään: jos yritys tuottaa enemmän, se saattaa saada enemmän päästöoikeuksia seuraavassa jaossa. Tai jos yritys sulkee tai perustaa uuden tehtaan, sen ilmaisjako saattaa muuttua. Kyse on eräänlaisesta tuotantotuesta, joka laskee yrityksen tuotantokustannuksia ja parantaa kilpailukykyä. Linkittyessä tämän tuotantotuen arvo muuttuu päästöoikeuksien hinnan muuttuessa. (Jaffe ja Stavins 2007, 37–38; Sterk et al. 2006, 18.)

Alkuperäinen ajatus päästökiintiöpäivitysten taustalla on huoli kilpailukyvystä. Suhteellinen päästökiintiö luo kilpailukykyyn vääristymän, jonka tarkoituksena on kumota olemassa olevia vääristymiä. Kun järjestelmät linkittyvät, tämä tarve poistuu. Toisin sanoen linkittyminen poistaa ongelman, jonka ratkaisemiseen päästökiintiöpäivitykset alun perin luotiin. Siksi linkittyessä päästökauppajärjestelmien optimointi edellyttää muutoksia järjestel-

mien rakenteissa. (Jaffe ja Stavins 2007, 38).

Ilmaisjaon päivitykset saattavat osaltaan nostaa linkittymisen jälkeistä päästöoikeuksien hintaa. Normaalisti yritys on halukas ostamaan päästöoikeuden hinnalla, joka on yhtä suuri tai pienempi kuin yrityksen päästövähennystoimien rajakustannus. Jos päästövähennystoimiin ryhtymisen odotetaan vaikuttavan ilmaisjaon päivityksiin, näiden odotusten arvo on lisättävä hintaan, jolla yritys on halukas ostamaan päästöoikeuksia. Ostohalukkuuden korkeampi hinta saattaa vähentää linkittymisen aikaansaamia kustannussäästöjä. (Jaffe ja Stavins 2007, 39–40.)

4.4 Päästöt

Lähtökohtaisesti linkittyneen kokonaisuuden päästöt ovat yksittäisten järjestelmien päästöjen summa. Ennen linkittymistä kiintiöjärjestelmän alueella voidaan tuottaa päästöjä enintään tarjolla olevien päästöoikeuksien verran: jos jokaista tuotettua hiilidioksiditonnia kohden yrityksellä on oltava päästöoikeus, niin päästöjä ei voida tuottaa päästöoikeuksien kokonaismäärää enempää. Kun kaksi kiintiöjärjestelmää linkittyy, järjestelmäkokonaisuuden päästöjen ylärajaksi muodostuu päästöoikeuksien yhteenlaskettu määrä.

Päästökaupassa päästöt on sidottu annetulle tasolle, edes teknologian kehittyminen ei vähennä päästöjä.⁴⁴ Vaikka teknologian kehittyisi ympäristöystävällisemmäksi, päästöoikeuksien määrä säilyy linkittymisen jälkeen entisellään. Siksi myös päästöjen kokonaismäärä säilyy entisellään. Hintamekanismi huolehtii siitä, että päästöjä tuotetaan päästökaton verran. Sen sijaan teknologian kehittymisen vaikutus näkyy päästöoikeuksien hinnassa, kun niiden kysyntä heikkenee. Päästökaupan piirissä puhtaampi teknologia laskee ilmastopolitiikan kustannuksia, mutta ei vähennä päästöjä. Voi tosin olettaa, että pidemmällä tähtäimellä teknologian kehittyessä laskevat päästövähennysten kustannukset kannustavat valtioita asettamaan tiukempia päästökattoja.

Kuitenkin käytännössä linkittyminen saattaa vaikuttaa toteutuneisiin päästöihin sekä linkittyneessä kokonaisuudessa, kokonaisuuden ulkopuolella että

⁴⁴ Olettaen, että $p_i^\epsilon > 0$ kaikilla i .

paikallisesti. Riippuen erilaisista rakenteellisista tekijöistä yhdistyvän kokonaisuuden päästöt voivat joko lisääntyä tai vähentyä. Jos päästöt muuttuvat järjestelmän ulkopuolella, voidaan sanoa, että linkki vaikuttaa hiilivuotoon.

Vaikka järjestelmäkokonaisuuden päästöt säilyvät ennallaan, yksittäisten järjestelmien päästöt joko lisääntyvät tai vähenevät linkittyessä. Lähtökohtaisesti paikallisesti tuotetut päästöt lisääntyvät järjestelmässä, jossa on päästöoikeudet ovat kalliimpia, ja joka on päästöoikeuksien netto-ostaja. Vastavasti halvemmassa järjestelmässä kasvihuonekaasuja tuotetaan linkin ansios-
ta aiempaa vähemmän. Lisäksi on syytä huomata, että ilmastopolitiikka vaikuttaa myös paikallisesti vaikuttaviin saasteisiin, joten myös linkittyminen vaikuttaa näihin.

4.4.1 Mittaus ja valvonta

Kiintiöjärjestelmät eroavat toisistaan käyttämiensä päästöjen mittausmetodien suhteen. Tähän liittyen päästöjen mittausvaihe muodostaa potentiaalisen ongelman linkittymiselle. Toiset järjestelmät mittaavat ja valvovat päästöjen aiheuttajia kuten tuotantolaitoksia (downstream regulation), kun taas toiset järjestelmät säätelevät päästölähteitä (upstream regulation) esimerkiksi velvoittamalla fossiilisten polttoaineiden myyjiä. On myös mahdollista toteuttaa mittaus näiden yhdistelmänä (hybrid design; Haites 2001, 38). Mittausvaihe määrittää, mitkä toimialat osallistuvat päästökauppaan. Esimerkiksi EU ETS-järjestelmä säätelee päästöjä aiheuttavia tuotantolaitoksia, kun taas NSW-järjestelmä säätelee fossiilisten polttoaineiden myyntiä. Erilaisten mittausvaiheiden johdosta on mahdollista, että yksittäinen päästövähennys huomioidaan kahteen kertaan. On kuitenkin syytä huomata, että tällainen ongelma syntyy linkittymisestä riippumatta, eikä se siten vaikuta linkittymisen arviointiin. (Jaffe ja Stavins 2007, 32–33; Ellis ja Tirpak 2006, 22.)

Erot päästöjen valvontajärjestelmissä saattavat vaikuttaa linkittymisen jälkeisiin kokonaispäästöihin. Päästöt saattavat lisääntyä, jos toisessa järjestelmässä on epätehokas valvontajärjestelmä. Toisaalta päästöt saattavat myös vähentyä, jos kevyt byrokratia lisää sääntöjen noudattamisalttiutta.

Jos valvontajärjestelmien eroja pidetään epäoikeudenmukaisina, linkin kannatus saattaa heiketä. Valvontajärjestelmien ei kuitenkaan tarvitse olla identtisiä. (Jaffe ja Stavins 2007, 41.) Valvontajärjestelmän tuottaman informaation luotettavuus on tärkeää. Myös mittausteknologian kehittyminen on syytä huomioida linkittymisessä siten, että uuden teknologian käyttöönotolle varataan mahdollisuus. (Ks. Haites ja Wang 2006, 6.)

Linkittymisen myötä tarjoutuu erityinen tilaisuus valvontajärjestelmien harmonisoinnille: Laaja ja yhdenmukainen valvontajärjestelmä luo synergiaetuja ja kustannuksia säästyy järjestelmäkokonaisuuden yksinkertaistuksessa.

4.4.2 Alkujako

Päästöjen kannalta kiintiöjärjestelmien linkittyminen on mahdollista, vaikka järjestelmät soveltavat erilaisia menetelmiä päästöoikeuksien alkujaossa ja päästökaton määrittämisessä.⁴⁵ Lähtökohtaisesti linkittyvien kiintiöjärjestelmien muodostaman kokonaisuuden päästökatto on yhtä suuri kuin yksittäisten järjestelmien päästökattojen summa. Jos päästöoikeuksia on niukasti kaikissa linkittyvissä järjestelmissä, järjestelmäkokonaisuuden päästöt säilyvät muuttumattomina.

Jos taas päästöoikeuksia jää käyttämättä yhdessä järjestelmässä, linkittymisen jälkeen ne voidaan myydä toiseen järjestelmään, mikä mahdollistaa päästöjen lisäämisen.

Tämä oletus ei kuitenkaan ole itsestään selvä, jos linkittyvissä järjestelmissä sovelletaan suhteellista tai dynaamista päästökattoa tai allokatiota. Järjestelmässä, jossa on suhteellinen päästökatto, päästöoikeuksien määrä muuttuu esimerkiksi suhteessa talouskasvuun tai toimijoille jaetaan enemmän päästöoikeuksia, kun tuotanto kasvaa. (Jaffe ja Stavins 2007, 35–36;

⁴⁵ Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään käsitettä *allowance allocation*. Tämän käsitteen ympärillä käydään kahta hyvin erilaista keskustelua, jotka on syytä erottaa toisistaan. Yhtäältä kansainvälisten ilmastopuolustuskeskustelujen yhteydessä keskustellaan allokatiosta, jolla viitataan kansainväliseen taakanjakoon ilmastomuutoksen lievittämiseksi. Toisaalta alueellisten ja kansallisten kiintiöjärjestelmien tapauksessa keskustellaan päästöoikeuksien allokoinnista yrityksille. Tämä problematiikka kiteytyy kysymyksiin siitä, missä määrin yrityksille pitäisi jakaa päästöoikeuksia ilmaiseksi ja kuinka paljon päästöoikeuksia tulisi huutokaupata. Tässä yhteydessä käsitellään erityisesti jälkimmäistä tapausta.

Ellis ja Tirpak 2006, 22.) Jos toisessa järjestelmässä on suhteellinen päästökatto, on mahdollista, että linkittäminen lisää päästöjä.

Tarkastellaan esimerkiksi tilannetta, jossa kiintiöjärjestelmä, jossa on dynaaminen (tai suhteellinen) päästökatto linkittyy järjestelmään, jossa on staattinen (tai absoluuttinen) päästökatto. Olkoon p_1^ϵ päästöoikeuksien hinta ennen linkittymistä järjestelmässä 1, jossa on dynaaminen päästökatto. Olkoon tämä hinta korkeampi, kuin staattisen päästökaton järjestelmässä, eli $p_1^\epsilon > p_2^\epsilon$. Olkoon K_1 kuvaus $y_1 \mapsto K_1(y_1)$ jatkuva ja aidosti kasvava, eli $\frac{\partial}{\partial p_1^\epsilon} K_1(y_1) > 0$. Nyt siis järjestelmän päästökatto kasvaa, kun tuotanto kasvaa. Ennen linkittymistä järjestelmän 1 päästökatto on $K_1(y_1^*(p_1^y, p_1^x), p_1^\epsilon)$. Päästöoikeuksien hinnan muutoksen vaikutus dynaamiseen päästökattoon nähdään, kun osittaisderivaatta jaetaan ketjusäännön avulla tekijöihin:

$$(4.28) \quad \frac{\partial}{\partial p_1^\epsilon} K_1(y_1^*(p_1^y, p_1^x, p_1^\epsilon)) = \underbrace{\frac{\partial K_1}{\partial y_1^*}}_{>0} \underbrace{\frac{\partial y_1^*}{\partial \epsilon_1^*}}_{>0} \underbrace{\frac{\partial \epsilon_1^*}{\partial p_1^\epsilon}}_{<0} < 0.$$

Kun kiintiöjärjestelmät linkittyvät, järjestelmän 1 osalta päästöoikeuksien hinta laskee. Epäyhtälöstä (4.28) nähdään, että päästöoikeuksien hinnan laskua seuraa päästökaton nousu. Näin siis linkittyminen kasvattaa sallittujen päästöjen kokonaismäärää $K_1 + K_2$. Jos päästöoikeuksien lähtöhinta on matalampi dynaamisen päästökaton järjestelmässä, muutos päästöoikeuksien määrässä on päinvastainen.

Tällaisen muutosten estäminen kaupanrajoitteilla on käytännössä hankalaa (Jaffe ja Stavins 2007, 35–36; Ellis ja Tirpak 2006, 22).

4.4.3 Muita vaikutuksia

Kiintiöjärjestelmien päästökauppakaudet ja päästöjen tilikaudet poikkeavat toisistaan.⁴⁶ Tästä huolimatta linkittäminen on mahdollista, mutta poikkea-

⁴⁶ Päästökauppajärjestelmän voimassaoloaika on poikkeuksetta määritetty rajalliseksi. Päästökauppakaudella (scheme period, compliance period) tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka kuluessa järjestelmä on voimassa ja sen säännöt ovat muuttumattomia. Esimerkiksi EU ETS:n toisen vaiheen päästökauppakausi käsittää vuodet 2008–2012. Tämä on syytä erottaa päästökaupan tilikauden käsitteestä (esim. control period). Tilikausi määrittää ajanjakson, jonka osalta toimijat joutuvat luovuttamaan päästöjään vastaavan määrän

vuudet saattavat muuttaa linkin päästövaikutuksia. Päästöt saattavat lisääntyä järjestelmässä, jossa on myöhempi aloitusaika, jos vanhemmassa järjestelmässä aiemmin tuotetut päästöoikeudet vyöryvät uuteen järjestelmään. Vaikutus on kuitenkin pieni, elleivät talletetut päästöoikeudet muodosta merkittävää osaa kaikista oikeuksista. (Ellis ja Tirpak 2006, 22–23.) Useissa suunnitteilla olevissa päästökauppajärjestelmissä talletusten määrää on rajoitettu.

Ilmastopolitiikan on todettu vaikuttavan myös paikallisiin saasteisiin. Kasvihuonekaasujen vähentämisen yhteydessä on helppo vähentää myös paikallisesti vaikuttavia saasteita (ks. esim. IPCC 2007, 674–676). Linkittyessä kallos järjestelmä menettää osan tästä lisähyötypotentiaalista (co-benefit potential), kun sen alueella tuotetaan aiempaa vähemmän päästövähennyksiä. Vastaavasti halpa järjestelmä hyötyy tässä suhteessa (Jaffe ja Stavins 2007, 19).

4.5 Rakenne

Päästökauppajärjestelmiin voidaan suunnitella monenlaisia kustannuksia hillitseviä rakenteellisia elementtejä (cost containment measures). Nämä ominaisuudet tai palvelut vaikuttavat syntyvien päästömarkkinoiden toimintaan. Tässä yhteydessä arvioidaan, miten tällaisten elementtien toiminta muuttuu linkittyessä. Toisaalta voidaan tarkastella, millaisia vaikutuksia on toisen järjestelmän kustannuksia hillitsevillä rakenteellisilla elementeillä. Lopuksi tarkastellaan mahdollisuuksia linkin rajoittamiseksi ja automaattisen leviämisen estämiseksi.

Järjestelmien linkittyessä osa näistä ominaisuuksista tai palveluista leviää automaattisesti (automatic propagation, de facto harmonization) myös toiseen järjestelmään, riippumatta siitä, oliko näitä aiemmin tarjolla. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi linkit kolmansiin osapuoliin, hiilipankkipalvelut ja varaventtiilit.

Jos linkittyvistä kiintiöjärjestelmistä toinen hyväksyy krediittijärjestelmäpäästöoikeuksia. Tämä on tyypillisesti kalenterivuosi.

mässä tuotettuja krediittejä tai kolmannen kiintiöjärjestelmän päästöoikeuksia, niin nämä linkit välittyvät epäsuorasti myös ensimmäiseen kiintiöjärjestelmään. Vaikkei ensimmäinen järjestelmä virallisesti kelpuuttaisikaan kolmannen osapuolen krediittejä ja päästöoikeuksia, ne on aina mahdollista vaihtaa toisen ja kolmannen järjestelmän välisen linkin puitteissa toisen järjestelmän päästöoikeuksiin, joita ensimmäinen järjestelmä hyväksyy. (Jaffe ja Stavins 2007, 43).

Osa kiintiöjärjestelmistä sallii päästöoikeuksien tallettamisen ja lainaamisen päästökauppakausien ja jaksojen ylitse. Linkittyessä nämä palvelut siirtyvät automaattisesti järjestelmään, jossa niitä ei ole (Jaffe ja Stavins 2007, 43). Jos esimerkiksi ensimmäinen järjestelmä ei salli päästöoikeuden lainaamista, voi toisen järjestelmän yritys lainata päästöoikeuden ensimmäisen järjestelmän yrityksen puolesta. Hiilipankkipalvelujen siirtyminen ei ole kovin merkittävä seikka linkittymisessä, sillä lähes kaikki järjestelmät tulevat sallimaan nämä palvelut (Jaffe ja Stavins 2007, 43), ainakin tallettamisen osalta.

Järjestelmien varaventiilit (tai hintakatot ja -lattiat) laskevat markkinoille päästöoikeuksia, kun tietty hintakynnys ylittyy, tai poistavat päästöoikeuksia markkinoilta, jos hinta laskee liian alas. Vaikutusten samankaltaisuuden johdosta myös päästövelvoitteiden noudattamatta jättämisestä seuraavat sakkomaksut voidaan joissain tapauksissa tulkita hintakattoina. Tällaiset varaventiilit siirtyvät järjestelmiin, joissa niitä ei ole. Jos useammassa järjestelmässä on varaventiili, vain alhaisin hintakatto on toiminnallinen ja vastaavasti korkein hintalattia. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 44–45; Haites 2001.)

Keskeistä on, että kiintiöjärjestelmä, jonka hintakatto on toiminnallinen, kerää tulot uusista päästöoikeuksista. Vastaavasti hintalattian toiminnasta aiheutuu kuluja järjestelmälle, jolla on korkein hintalattia. Järjestelmillä on siis taipumus asettaa varaventiilien kynnykset mahdollisimman alas. Siksi varaventiilien yhteensopimattomuus voi olla merkittävä este linkittymiselle. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 44–45).

Kustannuksia hillitsevien ominaisuuksien ja palveluiden leviämisen estämiseksi on kehitelty keinoja linkkien rajoittamiseksi: Ulkopuolisten päästö-

oikeuksien osuutta voidaan rajoittaa, niille voidaan asettaa vaihtokurssi tai niiden käytöstä voidaan periä maksu (Rehdanz ja Tol 2005). Näitä mekanismeja voidaan edelleen differoida ja sopeuttaa tarpeiden mukaan. On kuitenkin huomioitava, että rajoituksista riippumatta linkillä on taipumus lisätä suopeampien ominaisuuksien ja palveluiden käyttöä. (Jaffe ja Stavins 2007, 46).

Jotkin yritykset kaupankäynnin rajoittamiseksi ovat täysin tehottomia. Esimerkiksi varaventtiilin kautta saatujen päästöoikeuksien käyttöä on vaikea estää ilman, että kaikkien päästöoikeuksien käyttöä rajoitetaan. Tällainen rajoitus vain lisäisi varaventtiilin kautta saatujen päästöoikeuksien osuutta siellä, missä ne hyväksytään. Toisaalta jotkin rajoitukset voivat heikentää kustannuksia hillitsevien ominaisuuksien ja palveluiden leviämistä, kuten esimerkiksi ulkopuolisten päästöoikeuksien käyttöosuuden rajoittaminen. Kaupanrajoitukset kuitenkin rajoittavat myös linkistä saatavia hyötyjä. Käytännössä tämän kompromissin arvioiminen on hankalaa. (Jaffe ja Stavins 2007, 46).

Päästöoikeusrekisteri on keskeinen osa päästökauppajärjestelmän käytännön toteutusta ja toimintaa. Rekisterin tulee suoriutua luotettavasti kaupankäyntiin liittyvistä toiminnoista, kuten päästöoikeuksien siirroista, luomisesta, poistamisesta. Linkittyminen ei edellytä yhteistä rekisteriä. Rekisterin suunnittelussa on kuitenkin huomioitava yhteensopivuus muiden rekisterien kanssa. (Ks. Haites ja Wang 2006, 7.)

4.6 Päätöksenteko ja yhteensopivuus

4.6.1 Päätösvallan rajoittuminen

Yleisesti ottaen linkittyminen rajoittaa ja hajauttaa päätöksentekijöiden valtaa vaikuttaa päästökauppajärjestelmän rakenteeseen. Linkki lisää myös osapuolien keskinäistä riippuvuutta, sillä toisten harjoittama ilmastopolitiikka heijastuu linkin välityksellä vahvemmin.

Linkkiä arvioitaessa on tärkeä erottaa ne muutokset päätöksenteon mahdollisuuksissa, jotka ilmenevät linkittymisestä riippumatta. Päästökauppa-

järjestelmät vaikuttavat toisiinsa riippumatta siitä, ovatko ne linkittyneet. Esimerkiksi kotimaisten yritysten kilpailukyky muuttuu ulkomailla harjoitetun ilmastopolitiikan seurauksena, vaikka linkkiä ei olisikaan. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 20–21.) Jos ulkomailla ilmastopolitiikkaa tiukennetaan, niin ulkomaisten yritysten kilpailukyky heikkenee ja kotimaisten yritysten kilpailukyky paranee.

Päätösvallan rajoittuminen ilmenee erityisesti siinä, että päästökauppajärjestelmien rakenteita joudutaan harmonisoimaan kustannustehokkuuden ja yleisen toimivuuden takaamiseksi. Tärkeimpiä ovat allokaatioon liittyvät tekijät: erityisesti suhteelliset päästökattot ja kiintiöpäivitykset. Valinta ilmaisjaon ja huutokaupan välillä on hyvin kiistanalainen, eikä linkittyminen juuri helpota asiaa. Toiseksi, linkittyessä on syytä harmonisoida päästöjen monitorointiin, raportointiin, todentamiseen ja valvontaan liittyviä tekijöitä. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007, 48–49.) Kolmanneksi, teoreettisesta näkökulmasta on ilmeistä, että veropohja vaatii harmonisointia kilpailukyvyn vääristymien ehkäisemiseksi ja tehokkuuden takaamiseksi.

Linkittymissopimuksen yhteyteen lienee tarpeellista muodostaa mekanismi, joka arvioi säännöllisesti linkin edellytyksissä tapahtuvia muutoksia ja huolehtii linkin ylläpidosta (Ellis ja Tirpak 2006, 20–21). Päästökauppajärjestelmien hallinnolliset olosuhteet muuttuvat ajan kuluessa, nimelliset hinnat vaativat inflaatiokorjauksia, päästötavoitteita joudutaan muuttamaan (ks. Haites ja Wang 2006, 8–11).

Toinen päätösvallan rajoittumisen muoto ilmenee päästökauppajärjestelmien automaattisena harmonisointina. Uusi suora linkki muodostaa epäsuoran linkin kolmansiin järjestelmiin: jos ensimmäinen järjestelmä hyväksyy kolmannen krediitti- tai kiintiöjärjestelmän arvopaperit, tulevat nämä käytännössä hyväksytyksi myös toisessa järjestelmässä. Vastaavasti mahdollisuus päästöoikeuksien tallettaminen ja lainaamiseen leviää muihin järjestelmiin, kuten myös varaventiilimekanismit.

4.6.2 Päästökaton asettaminen

Linkittyminen muuttaa päästökaton asettamisen kannustimia. Kun järjestelmä on linkittynyt osaksi laajempaa kiintiöjärjestelmien verkostoa, niin päästöoikeuksien kansainvälinen hinta p^ϵ on joustamattomampi päästökaton suhteen, joten päästöoikeuksien muodostaman varallisuuserän arvoa voidaan kasvattaa luomalla uusia päästöoikeuksia.

Tarkastellaan kahta maata edustavaa yritystä kuten alaluvussa 4.1.5. Oletetaan, että maat asettavat päästökattonsa siten, että huutokaupasta saatu tulo $\pi_i = p_i^\epsilon K_i$ maksimoidaan kuten kaavassa (3.29) eli

$$(4.29) \quad \max_{K_i} p_i^\epsilon K_i,$$

jossa $i = 1, 2$.

Olkoon yrityksillä identtiset, ehtojen (3.9) mukaiset tuotantofunktiot f (alaluvussa 4.1.5 käytetty parametri $\beta = 1$). Olkoon lisäksi päästöjen rajatuottavuuskäyrä konvekksi eli $\frac{\partial^3 f(x_i, \epsilon_i)}{\partial \epsilon_i^3} < 0$ kaikilla $i = 1, 2$.⁴⁷

Olkoon edustavilla yrityksillä identtiset päästökauppajärjestelmät.

Olkoon $x_1^s, x_2^s > 0$ vakioita ja merkitään $x_1^s = x^s$ ja $x_2^s = \alpha x^s$, jossa $\alpha \in]0, 1]$. Kun $0 < \alpha < 1$, niin $x_1^s > x_2^s$, eli talousalue 1 on suurempi. Jos $\alpha = 1$, niin talousalueet ovat samankokoiset. Olkoon lisäksi $p_1^\epsilon, p_2^\epsilon > 0$ ja $p^y = 1$. Oletetaan, että kaikki panokset käytetään, eli $x_1 = x_1^s$ ja $x_2 = x_2^s$.

Kun oletetaan, että päästöoikeuksia on niukasti, niin päästöoikeuksien hinta määrittyy ennen linkittymistä paikallisilla markkinoilla ratkaisuehdosta:

$$(4.30) \quad p_i^\epsilon = \frac{\partial f(x_i^s, \epsilon_i^*)}{\partial \epsilon_i},$$

⁴⁷ Oletusta tarvitaan seuraavan maksimointiongelman toisen asteen ehtojen takaamiseksi. Tässä riittäisi myös edellisen implikoima heikompi mutta epäintuitiivinen oletus:

$$\frac{\partial^3 f(x_i, \epsilon_i)}{\partial \epsilon_i^3} \epsilon_i^* + 2 \frac{\partial^2 f(x_i, \epsilon_i)}{\partial \epsilon_i^2} < 0$$

kaikilla $i = 1, 2$.

jossa $\epsilon_i^* = K_i$ kaikilla $i = 1, 2$. Määritellään yhtälön (4.30) avulla tasapainohinnan määrittävä funktio $(x_i^*, \epsilon_i^*) \mapsto p_i^\epsilon$.

Kun hinta p_i^ϵ derivoidaan päästökaton K_i suhteen ja sovelletaan ketjusääntöä, nähdään, miten hinta muuttuu, kun päästökattoa muutetaan:

$$(4.31) \quad \frac{\partial p_i^\epsilon}{\partial K_i} = \frac{\partial^2 f(x_i^s, \epsilon_i^*)}{\partial \epsilon_i^2} \underbrace{\frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i}}_{=1}.$$

Koska ilman linkkiä kaikki päästöoikeudet käytetään eli $\epsilon_i^* = K_i$, niin päästöjen kysyntä muuttuu samassa suhteessa päästökaton kanssa eli $\frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i} = 1$.

Nyt päästökatto K_i^* on maksimointiongelman (4.29) ratkaisu saadaan käyttämällä voiton π_i määritelmää, tulon derivointisääntöä sekä yhtälöitä (4.30) ja (4.31):

$$(4.32) \quad \frac{\partial \pi_i}{\partial K_i} = \frac{\partial p_i^\epsilon}{\partial K_i} K_i^* + p_i^\epsilon = \frac{\partial^2 f(x_i^s, K_i^*)}{\partial \epsilon_i^2} \frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i} K_i^* + \frac{\partial f(x_i^s, K_i^*)}{\partial \epsilon_i} = 0$$

kaikilla $i = 1, 2$. Ratkaisu toteuttaa toisen asteen ehdon

$$\frac{\partial^2 \pi_i}{\partial K_i^2} = \frac{\partial^3 f(x_i^s, K_i^*)}{\partial \epsilon_i^3} K_i^* + 2 \frac{\partial^2 f(x_i^s, K_i^*)}{\partial \epsilon_i^2} < 0,$$

joten ratkaisu todella on maksimi. Samalla nähdään, että $\frac{\partial \pi_i}{\partial K_i}$ on aidosti vähenevä.

Tutkitaan optimaalisten päästökattojen K_1^* ja K_2^* suhdetta. Koska $\frac{\partial \pi_1}{\partial K_1} = 0 = \frac{\partial \pi_2}{\partial K_2}$ ja koska $\frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i} = 1$ kaikilla $i = 1, 2$, niin

$$(4.33) \quad \frac{\partial^2 f(x_1^s, K_1^*)}{\partial \epsilon_1^2} K_1^* + \frac{\partial f(x_1^s, K_1^*)}{\partial \epsilon_1} = \frac{\partial^2 f(x_2^s, K_2^*)}{\partial \epsilon_2^2} K_2^* + \frac{\partial f(x_2^s, K_2^*)}{\partial \epsilon_2}.$$

Edelleen, koska $x_1^s = x^s$ ja $x_2^s = \alpha x^s$ ja koska lineaarisesti homogeenisen tuotantofunktion f toisen asteen derivaatta on -1 asteen homogeeninen funktio, niin

$$(4.34) \quad \frac{\partial^2 f(x^s, K_1^*)}{\partial \epsilon_1^2} K_1^* + \frac{\partial f(x^s, K_1^*)}{\partial \epsilon_1} = \frac{\partial^2 f(x^s, \frac{K_2^*}{\alpha})}{\partial \epsilon_2^2} \frac{K_2^*}{\alpha} + \frac{\partial f(x^s, \frac{K_2^*}{\alpha})}{\partial \epsilon_2}.$$

Koska $\frac{\partial \pi_i}{\partial K_i}$ on aidosti vähenevä, tästä nähdään, että $K_1^* = \frac{K_2^*}{\alpha}$, joten voidaan merkitä $K_1^* = K$ ja $K_2^* = \alpha K$. Tämä osoittaa, että järjestelmät asettavat päästökattonsa siten, että ne ovat samassa suhteessa talouden kokoon eli $\frac{K_1^*}{x_1^s} = \frac{K_2^*}{x_2^s}$. Edelleen päästöjen rajatuottavuuden nollannen asteen homogeenisuudesta seuraa, että hinta on molemmissa järjestelmissä sama eikä linkittäminen vaikuta hintaan eli $p_1^\epsilon = p^\epsilon = p_2^\epsilon$.

Tarkastellaan seuraavaksi päästöjen kysynnän ja päästökaton suhdetta linkittyneillä markkinoilla. Kun oletetaan, että päästöoikeuksia on niukasti, niin päästöoikeuksien hinta määrittyy linkittyneillä markkinoilla ratkaisuehdoista:

$$\frac{\partial f(x^s, \epsilon_1^*)}{\partial \epsilon} = p^\epsilon = \frac{\partial f(\alpha x^s, \epsilon_2^*)}{\partial \epsilon} \quad \text{ja} \\ \epsilon_1^* + \epsilon_2^* = K_1^* + K_2^*.$$

Kuten alaluvussa 4.1.5 ensimmäisestä yhtälöstä saadaan nollannen asteen homogeenisuuden ja aidon monotonisuuden avulla $\epsilon_1^* = \epsilon_2^*/\alpha$. Sijoittamalla tämä toiseen yhtälöön saadaan

$$(4.35) \quad \epsilon_1^* = \frac{1}{1+\alpha}(K_1^* + K_2^*) \quad \text{ja} \quad \epsilon_2^* = \frac{\alpha}{1+\alpha}(K_1^* + K_2^*).$$

Koska $K_1^* = K$ ja $K_2^* = \alpha K$, huomataan lisäksi, että $\epsilon_1^* = K = K_1^*$ ja $\epsilon_2^* = \alpha K = K_2^*$.

Derivoimalla yhtälön (4.35) kysynät päästökaton K_i^* suhteen saadaan

$$(4.36) \quad \frac{\partial \epsilon_1^*}{\partial K_i^*} = \frac{1}{1+\alpha} < 1 \quad \text{ja} \quad \frac{\partial \epsilon_2^*}{\partial K_i^*} = \frac{\alpha}{1+\alpha} < 1$$

kaikilla $i = 1, 2$.

Tarkastellaan nyt huutokauppatulojen π_i derivaattaa päästökaton K_i suhteen, kun päästökatto on tasolla K_i^* , joka oli optimaalinen ennen linkittymistä. Kun huomioidaan yhtälö (4.32), ja että derivaatat yhtälöissä (4.36) ovat

pienempiä kuin ennen linkittymistä, niin

$$(4.37) \quad \begin{aligned} \frac{\partial \pi_i}{\partial K_i} &= \frac{\partial^2 f(x_i^s, \epsilon_i^*)}{\partial \epsilon_i^2} \frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i} K_i^* + \frac{\partial f(x_i^s, \epsilon_i^*)}{\partial \epsilon_i} \\ &= \underbrace{\frac{\partial^2 f(x_i^s, K_i^*)}{\partial \epsilon_i^2}}_{<0} \underbrace{\frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i} K_i^*}_{<1} + \underbrace{\frac{\partial f(x_i^s, K_i^*)}{\partial \epsilon_i}}_{p^\epsilon} > 0, \end{aligned}$$

eli huutokauppatuloja π_i on mahdollista kasvattaa kasvattamalla päästökattoa K_i kaikilla $i = 1, 2$.⁴⁸ Käytännössä tämä tarkoittaa, että päästökauppajärjestelmällä on linkittymisen jälkeen kannustin kasvattaa päästökattoaan.

Edellinen ilmiö korostuu, jos järjestelmien koko ero on suuri. Yhtälöistä (4.36) nähdään, että

$$(4.38) \quad \frac{\partial \epsilon_1^*}{\partial K_i} \rightarrow 1 \quad \text{ja} \quad \frac{\partial \epsilon_2^*}{\partial K_i} \rightarrow 0, \quad \text{kun } \alpha \rightarrow 0$$

kaikilla $i = 1, 2$. Nyt yhtälöstä (4.37) nähdään, että

$$(4.39) \quad \frac{\partial \pi_1}{\partial K_i} \rightarrow 0 \quad \text{ja} \quad \frac{\partial \pi_2}{\partial K_i} \rightarrow p^\epsilon, \quad \text{kun } \alpha \rightarrow 0.$$

Tämä tarkoittaa, että mitä pienempi järjestelmä 2 on, sitä vähemmän järjestelmä 1 ja toisaalta sitä enemmän järjestelmä 2 voivat vaikuttaa huutokauppatuloihinsa. Toisin sanoen, jos järjestelmä 2 on hyvin pieni, järjestelmällä 1 on vain vähäinen kannusti kasvattaa päästökattoaan, mutta toisaalta järjestelmä 2 voi luoda uusia päästöoikeuksia ilman, että markkinahinta juuri muuttuu.

Koska linkittyneessä kokonaisuudessa päästöoikeuksien lisääminen ei juuti laske päästöoikeuksien hintaa, pieni järjestelmä voi helposti kasvattaa päästöoikeuksiensa kokonaisarvoa. Pahimmillaan pienikin järjestelmä voi luoda uusia päästöoikeuksia niin paljon, että niukkuus poistuu ja hinta painuu nolaa molemmissa järjestelmissä.

Kannustimet päästökaton asettamiselle muuttuvat merkittävästi linkit-

⁴⁸ Yhtälön (4.37) lauseke on positiivinen, koska ensimmäisen, negatiivisen termin tekijä $\frac{\partial \epsilon_i^*}{\partial K_i}$ on pienempi kuin yhtälössä (4.32).

tyessä – erityisesti, jos järjestelmien kokoero on suuri.

4.6.3 Linkin rajoittaminen

Kun linkittymisen olosuhteet, mahdollisuudet ja uhat on arvioitu, voidaan tarkastella keinoja linkittymisen vaikutusten hillitsemiseksi. Linkkiä voidaan yrittää rajoittaa eri tavoin, jolloin eräät ongelmista voidaan välttää. On myös tarpeen tunnistaa toimenpiteet, jotka ovat houkuttelevia mutta tehottomia, ja toisaalta rajoitteiden mukanaan tuomat ongelmat.

Ensinnäkin toisen järjestelmän päästöoikeuksien käytölle voidaan asettaa rajoitus tai ehto (ks. esim. Rehdanz ja Tol 2005). Tyypillisesti ulkopuolisia päästöoikeuksia tai krediittejä voi käyttää vain rajoitetun määrän.

Tällaista rajoitusta on esitetty käytettäväksi erityisesti toisen järjestelmän varaventtiilien varalta. Varaventtiin kautta syntyneitä päästöoikeuksia ei kuitenkaan pystytä erikseen kieltämään, ainakaan kokonaan: Jos uudet päästöoikeudet kielletään yhdessä järjestelmässä, ne käytetään toisessa järjestelmässä. Toisin sanoen vanhat päästöoikeudet siirtyvät ensimmäiseen järjestelmään ja uusien päästöoikeuksien osuus kasvaa toisessa järjestelmässä. (Jaffe ja Stavins 2007, 46). Tätä voi jatkua, kunnes toisen järjestelmän yritykset käyttävät pelkästään varaventtiilin kautta syntyneitä päästöoikeuksia ja kaikki toisen järjestelmän alkuperäiset päästöoikeudet ovat siirtyneet ensimmäiseen järjestelmään. Vasta tämän jälkeen kyseinen rajoitus muuttuu toiminnalliseksi.

Vaikka asetetaan ehto, että linkki on voimassa vain, jos varaventtiiliä ei käytetä, varaventtiilin vaikutus heijastuu siitä huolimatta. Linkki lisää varaventtiilin käytön todennäköisyyttä, jolloin vaikutus on sama: hinta laskee järjestelmässä, jossa varaventtiiliä ei ole, ja varaventtiilin käytön mahdollisuus heikentää päästöoikeuksien niukkuutta markkinoilla. (Jaffe ja Stavins 2007, 46–47).

Toiseksi päästöoikeuksille voidaan asettaa vaihtokurssi. Silloin yhden järjestelmän päästöoikeudella saa tuottaa erimäärän päästöjä toisessa järjestelmässä. (Rehdanz ja Tol 2005; Jaffe ja Stavins 2007, 46). Jos esimerkiksi MRV-järjestelmien eroavaisuuksien johdosta tällainen vaihtokurssi vastaa re-

aalisia eroja kunkin järjestelmän päästöoikeuksien edustamissa päästöissä ja nämä erot ovat samansuuntaisia suuressa osaa tuotantoa, niin vaihtokurssilla voidaan oikaista aitoja tehokkuushaittoja. Kolmanneksi toisen järjestelmän päästöoikeuksien käytöstä voidaan periä maksu (Rehdanz ja Tol 2005; Jaffe ja Stavins 2007, 46).

Lopuksi on hyvä todeta, että järjestelmien ylläpitäjillä on aina mahdollisuus katkaista linkki. Tämä tosin aiheuttaisi lähinnä linkittymiselle käänteisiä vaikutuksia, erityisesti päästöoikeuksien hinnassa. Lisäksi se jättäisi osan investoinneista tyhjän päälle ja saattaisi aiheuttaa epätoivottuja distributiovaikutuksia. (Jaffe ja Stavins 2007, 51–52; Haites ja Wang 2006, 11–12.) Luonnollisesti, jos kiintiöjärjestelmä on osana kiintiöjärjestelmien verkostoa, sen tulisi myös katkaista linkki muihin verkoston jäseniin.

4.6.4 Kansainvälinen ilmastopöimur ja linkittymisprosessi

Tässä tutkielmassa kuvattujen linkittymisen muodostamien kansainvälisten riippuvuussuhteiden johdosta linkittyminen edellyttää osapuolien sopimista monista seikoista, jotta linkkien muodostaminen olisi mahdollista. On kuitenkin syytä huomata, että sopimista vaativia tekijöitä on huomattavasti vähemmän verrattuna globaaliin päästökauppajärjestelmään (ks. alaluku 2.1). Linkittymisen kannalta olisi tärkeää luoda sopimus, joka edustaa yhteisymmärrystä eri kiintiöjärjestelmien ilmastopöimur tiukkuudesta. Kuten aiemmin on havaittu linkittyneessä kokonaisuudessa päästökaton muutokset aiheuttavat muutoksia pääomavirroissa ja päästökaton korottaminen kasvattaa huutokauppatuloja. Siksi kansainvälisesti tulisi sopia, mille tasolle kansalliset päästökatot asetetaan, ja miten päästökatoista sovitaan jatkossa. (Ks. myös Jaffe ja Stavins 2007, 50–51; Blyth & Bosi 2004, 5.) Järjestelmiä ja linkin ehtoja on syytä päivittää, kun esimerkiksi väkiluku, teknologia ja osallistuvien yritysten joukko muuttuu (ks. Haites ja Wang 2006, 5).

Linkittymisen aiheuttamien rasitteiden epätasaisuuksia voi myös ajatella etuna, sillä ne tarjoavat mahdollisuuden YK:n ilmastomuutosta koskevassa

yleissopimuksessa sovitun ”yhteisen mutta eriytyneen vastuun” -periaatteen⁴⁹ toteuttamiselle. (Ks. Jaffe ja Stavins 2007.)

Lisäksi on hyvä sopia siitä, millainen on ilmastopolitiikan rahoituksen perusta. Tarkemmin sanottuna kilpailukyvyn vääristymien ehkäisemiseksi olisi sovittava, missä määrin kansallisissa sopimuksissa ilmastopolitiikan rahoitustarpeesta katetaan yritystason kiintiöjärjestelmien avulla. Jos julkinen sektori rahoittaa päästövähennyksiä kiintiöjärjestelmän ulkopuolella ja jakaa vapautuneet päästöoikeudet kotimaisille yrityksille, niin ilmastopolitiikasta yrityksille aiheutuneet kustannukset pienenevät. Ilman linkkiä kauppapolitiikan näkökulmasta julkisen sektorin toimenpiteet ovat siis eräänlainen vientituki kotimaisille yrityksille. Julkisen sektorin päästövähennysprojektit laskevat rajakustannuksia, kun päästöoikeuksien hinta laskee. Linkittyminen muuttaa tämän tuen muotoa: Vientituesta tulee könttäsumatuki, kun kotimaisille yrityksille jaetut uudet päästöoikeudet laskevat hintaa aiempaa vähemmän.

On kuitenkin huomattava, että tätä keinoa käyttämällä valtio ei voi säästää ilmastopolitiikassa ilmaista etua, kuten löysien päästötavoitteiden tapauksessa. Tässä valtio joutuu aidosti maksamaan ylimääräisistä päästöoikeuksista, joilla se tukee kotimaisia yrityksiä. Siksi rahoitusperustaan liittyvää mekanismia ei tarvitse pitää linkittymisen esteenä.

Voidaan kuitenkin todeta, että ensinäkin linkittäminen vaikuttaa valtioiden ilmastopolitiikan rahoituksen rakenteeseen, ja toiseksi ilmastopolitiikka tarjoaa monenlaisia mahdollisuuksia harjoittaa kauppapolitiikkaa. Onkin syytä huomioida ilmastopolitiikan talousvaikutus myös kansainvälisten vapaakauppasopimusten näkökulmasta.

Linkittyminen on mahdollista myös yhteisen ilmastopimuksen ulkopuolella (Ellis ja Tirpak 2006, 20). Jos kahdella järjestelmällä on suhteellisen samanlainen rakenne ja niissä on aidosti niukka päästökatto, niin linkittyminen hyödyttää molempia osapuolia. Kuitenkin nämä hyödyt jakautuvat epätasaisesti osapuolien kesken, joten käytännössä linkittyminen on epätodennäköistä ilman yhteisymmärrystä siitä, miten nämä hyödyt jaetaan. Onkin oletettavaa, että ilman kattavaa kansainvälistä ilmastopimusta, linkittymisproses-

⁴⁹ Ks. Ilmastomuutosta koskeva Yhdistyneiden Kansakuntien puitesopimus, 3. artikla, 1. pykälä.

si voi edetä bi- ja multilateraalisten sopimusten avulla. Kansainvälinen vapaamatkustajaongelma voi kuitenkin olennaisesti vähentää ilmastopolitiikan poliittista kannatusta.

Käytännössä ilmastopimusten ulkopuolisiin päästökauppajärjestelmiin linkittyminen synnyttää varsin merkittävän ongelman: Linkki muuttaa ilmastopimuksen piirissä toimivan päästökauppajärjestelmän alueella toteutuneita päästöjä. Yhtäältä linkin myötä päästövähennysten tuotanto saattaa keskittyä ilmastopimuksen ulkopuoliseen järjestelmään. Tämän seurauksena ilmastopimuksen jäsenen alueella tuotetut päästöt lisääntyvät ja linkittymiskumppanin päästöt vähenevät. Jos ilmastopimus ei tunnista, että päästövähennykset tuotetaan linkin ansiosta jäsenmaan alueen ulkopuolella, ilmastopimuksen jäsen joutuu hankkimaan lisää ilmastopimuksen hyväksymiä päästöoikeuksia. Toisin sanoen linkki aiheuttaa ilmastopimuksen jäsenelle lisäkustannuksen, vaikka linkin osapuolten yhteen lasketut päästöt eivät lisäänty.

Toisaalta, jos linkin seurauksena päästövähennysten tuotanto keskittyy ilmastopimuksen jäsenmaan alueelle, jäsenelle jää aiempaa enemmän käyttämättömiä ilmastopimuksen määrittelemiä päästöoikeuksia. Kun ylimääräiset päästöoikeudet myydään markkinoille, globaalilla tasolla päästöt lisääntyvät.

Esimerkkinä voidaan tarkastella EU ETS:n ja yhdysvaltalaisen RGGI:n linkittymistä. Yhdysvallat ei ole Kioton pöytäkirjan jäsen ja RGGI:n päästöoikeudet ovat huomattavasti halvempia. Järjestelmien linkittäminen siirtää päästövähennyksiä halvempaan RGGI-järjestelmään, jolloin Euroopan alueella päästöt lisääntyvät. Koska EU-maat ovat pöytäkirjan jäseniä, ne tarvitsevat aiempaa enemmän Kioton AAU-päästöoikeuksia tai muita Kiotoyksikköjä kattaakseen lisääntyneet päästöt. Kioton pöytäkirja ei siis huomioi, että EU-alueen lisääntyneiden päästöjen vastapainona Yhdysvalloissa on tuotettu päästövähennyksiä aiempaa enemmän.

Ongelman estämiseksi on suunniteltu mekanismeja, joilla pyritään rajoittamaan ilmastopimuksen rajat ylittäviä linkkejä siten, että ongelmaa ei syntyisi. Ilmastopimuksen päästötavoitteiden kannalta ei ole ongelmallista, jos maan alueella tuotetut päästöt alittavat päästötavoitteen. Siksi linkille

voidaan asettaa ehto, joka estää maata päätyästä päästöoikeuksien netto-ostajaksi. Tällainen ehto takaa, että päästöt eivät ylitä ilmastopimuksen päästötavoitetta. Ehdon voimassa ollessa linkki toiminnallisuus edellyttää, että ilmastopimuksen jäsenmaan järjestelmässä päästöoikeuksien hinta on matalampi. Euroopan tapauksessa tämä tarkoittaa, että EU ETS on mielekästä linkittää vain sellaisiin Kioto-alueen ulkopuolisiin järjestelmiin, joissa on päästöoikeudet ovat kalliimpia.

Luku 5

Johtopäätökset

Linkittymisen problematiikan voi tiivistää varsin yksinkertaisiin elementteihin. Alkuun tarkastelulle on annettava tarkoitus. Funktionaalisesta näkökulmasta linkittyminen on keino parantaa ilmastopolitiikan kustannustehokkuutta. Teknisestä näkökulmasta linkittymisessä on kyse siitä, että yksi päästökauppajärjestelmä hyväksyy toisen järjestelmän päästöyksikön. Tämä kertoo, mitä linkittymisessä pohjimmiltaan tapahtuu. Yhteiskunnallisesta näkökulmasta on kysyttävä, miten linkittyminen vaikuttaa laajemmin talouteen, ympäristöön ja politiikkaan.

Tarkastelu on kuitenkin osoittanut, että olosuhteista riippumatta linkittyminen ei ole yksinkertainen prosessi. Linkittyminen muodostaa monimutkaisen vuorovaikutusten verkoston. Ylivoimaisesti suurimmaksi haasteeksi muodostui problematiikan jäsentäminen mielekkääksi kokonaisuudeksi.

Tässä tutkielmassa on esitelty linkittymiseen liittyvistä syy-seuraus-suhteista vain ilmastopolitiikan kannalta keskeisimmät. On kuitenkin tunnustettava, että tässä monimutkaisessa vuorovaikutusten verkostossa, kuten reaali maailmassa yleisesti, on mahdotonta huomioida kaikkia tekijöitä ja niiden merkitystä lopputuloksen kannalta. Jaottelu keskeisiin ja vähemmän tärkeisiin seikkoihin perustuu ensisijaisesti teoreettiseen arviointiin. Toistaiseksi linkittymisestä on vain vähän käytännön kokemuksia.

Esitettyjen syy-seuraus-suhteiden lisäksi tutkimusta varten on jouduttu tarkastelemaan monia vuorovaikutuksen muotoja, jotka ovat osoittautuneet tutkimuskysymyksen kannalta merkityksettömiksi. Nämä huomiot on jätetty

pois varsinaisesta tekstistä, jotta esitys voitaisiin pitää tiiviinä.

Tarkastelu on kuitenkin tuottanut monia tuloksia.

Ensinäkin linkki vaikuttaa ilmastopolitiikan kustannustehokkuuteen. Lähtökohtaisesti kustannustehokkuus paranee ja ilmastopolitiikan yhteenlasketut kokonaiskustannukset pienenevät. Siirtymällä perinteisistä krediittijärjestelmistä NL-järjestelmiin voidaan parantaa ilmastopolitiikan kustannustehokkuutta, jos krediittien käyttöä on rajoitettu sitovasti ja krediittien hinta määräytyy kiintiöjärjestelmän rajakustannusten mukaan. Staattisessa tarkastelussa päästömarkkinoiden koko- ja hintaerojen suuruus määrittää säästöpotentiaalin. Linkittäminen poistaa päästöyksiköiden hintaeron ja laajentaa hiilimarkkinoita.

Toiseksi linkki luo sekä voittajia että häviäjiä yritysten osalta. Linkittymisen vaikutus riippuu päästöoikeuksien ilmaisjaon suuruudesta, kyvystä vähentää päästöjä sekä toimialan kilpailullisuudesta. Julkisen sektorin näkökulmasta linkittyminen vähentää ilmastopolitiikan kustannuksia lähtötilanteesta riippumatta. Kallis järjestelmä säästää päästövähennysten kustannuksissa, mutta maksaa ylimääräisistä päästöoikeuksista. Halpa järjestelmä saa tuloja päästöoikeuksien myynnistä, mutta se joutuu investoimaan uusiin päästövähennyksiin.

Kolmanneksi linkki vaikuttaa yritysten kilpailukykyyn. Linkittyminen poistaa päästökaupasta johtuvan kilpailukykyeron eri järjestelmissä toimivien yritysten väliltä. Linkittymismallin puitteissa alkujako ei vaikuta eri järjestelmissä toimivien yritysten keskinäiseen kilpailukykyyn ennen ja jälkeen linkittymisen, kunhan yritykset eivät voi vaikuttaa ilmaisjaossa saatujen päästöoikeuksien määrään. Laajemmassa kontekstissa alkujako toki vaikuttaa kilpailukykyyn, mutta pääasiassa tämä problematiikka säilyy linkittymisestä riippumatta.

Neljänneksi linkki saattaa vaikuttaa päästöjen määrään. Lähtökohtaisesti linkittyneen kokonaisuuden päästöt ovat yksittäisten järjestelmien päästöjen summa. Poikkeuksen muodostaa NL-järjestelmä, sillä NL-krediittien käyttö vähentää päästöjä. Päästöt saattavat lisääntyä, jos järjestelmiin on luotu ongelmallisia ominaisuuksia kuten dynaaminen päästökatto. Mittaus-, raportointi- ja todentamisyjärjestelmien (MRV) sekä valvontajärjestelmän har-

monisointi ehkäisee päästöjen lisääntymistä ja luo synergiaetuja.

Viidenneksi linkittäminen vaikuttaa päästökauppajärjestelmien rakentamiseen. Eräät ominaisuudet siirtyvät automaattisesti linkin yli järjestelmästä toiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi päästöoikeuksien talletus- ja lainapalvelut sekä varaventiilit ja linkit kolmansiin osapuoliin. Toisaalta linkki vaikuttaa siihen, millaisia ominaisuuksia järjestelmään kannattaa rakentaa.

Kuudenneksi linkittymisellä on vaikutuksia, joita voi luonnehtia poliittisiksi. Linkki hajauttaa ja rajoittaa päätöksentekijöiden valtaa vaikuttaa päästökauppajärjestelmän rakentamiseen ja hiilimarkkinoiden toimintaan. Poliittiselta katsannolta linkittyminen edellyttää sitovaa sopimusta päästökattosta, sillä linkittyminen muuttaa kannustimia päästökaton asettamiselle. Löysäämällä päästökattoaan järjestelmä voi kasvattaa huutokauppatulojaan toisen järjestelmän kustannuksella. Linkki vaatii jatkuvaa ylläpitoa. Kansainvälisen kauppapolitiikan näkökulmasta päästökauppa tarjoaa monenlaisia mahdollisuuksia tukea vientiyrityksiä ja linkittyminen vaikuttaa näihin mahdollisuuksiin. Kansainvälinen ilmastopimus sitovista päästötavoitteista edesauttaa merkittävästi linkittymisprosessia, mutta linkittyminen on mahdollista myös bi- ja multilateraalisten ilmastopimusten turvin.

Liite A

Paikallisia yritystason kiintiöjärjestelmiä

A.1 Regional Greenhouse Gas Initiative

A.1.1 RGGI:n kiintiöjärjestelmä

RGGI (Regional Greenhouse Gas Initiative) on vuonna 2003 aloitettu kymmenen Yhdysvaltain osavaltion muodostama yhteishanke, jonka perustama päästökauppajärjestelmä aloitti toimintansa vuoden 2009 alussa. Päästökauppajärjestelmä on pääasiassa kiintiöjärjestelmä (CO₂ Budget Trading Program), jonka yhteyteen on suunniteltu myös krediittijärjestelmä (emissions offset provisions). Järjestelmän rakenne, toimintaperiaatteet ja tarkat säännöt on määritellyt *Regional Greenhouse Gas Initiative Model Rule* -asiakirjassa (RGGI 2007b).

Järjestelmän toiminta on ajoitettu vuosille 2009-2018. Ensimmäisen kuuden toimintavuoden tavoitteena on rajoittaa päästöt vuoden 2009 tasolle. Viimeisen neljän vuoden aikana päästöjä tiputetaan yhteensä 10 % vuoden 2009 tasosta. (RGGI 2007a). Päästökaupan tilikautena (control period) on lähtökohtaisesti kolme vuotta (RGGI 2007a). Verrattuna EU ETS:iin RGGI:n päästötavoitteet ovat varsin löysät. EU:n tavoite on vähentää päästöjä vähintään 20 % vuoteen 2020 mennessä käyttäen vuotta 1990 vertailukohtana. (Vuoden 1990 ja 2005 välillä Yhdysvaltojen kokonaispäästöt ovat

kasvaneet noin 16 %, joten todennäköisesti RGGI tavoite ei edes riitä palauttamaan päästöjä vuoden 1990 tasolle.⁵⁰)

Järjestelmään osallistuvat sähköntuotantolaitokset, jotka käyttävät fossiilisia polttoaineita ja tuottavat yli 25 megawattia. Kokonaisuudessaan päästöjä on vuositasolla mukana noin 207 hiilidioksiditonnin edestä eli noin 10 % verrattuna EU ETS:n kokoon. (RGGI 2007a, 2–3.) Kasvihuonekaasuista mukana on vain hiilidioksidi.

Alkujaon osalta järjestelmä soveltaa pääasiassa päästöoikeuksien huutokauppaa. Tätä perustellaan sillä, että sähkön tuottajilla on taipumus siirtää päästöoikeuksien arvo kuluttaja hintoihin, vaikka ne olisi saatu ilmaiseksi. Huutokaupasta saadut tulot aiotaan kohdentaa toimenpiteisiin, joilla pyritään lieventämään sähkön kuluttajilla aiheutuneita kustannuksia. (RGGI 2007a, 4.)

RGGI-järjestelmään on suunniteltu erityinen mekanismi, jolla pyritään kannustamaan kuluttajia käyttämään uusiutuvaa energiaa. Mekanismi vastaa ongelmaan, joka syntyy, kun uusiutuvan energian käyttö vapauttaa päästöoikeuksia. Esimerkiksi tuulivoiman rakentaminen vähentää osaltaan hiilidioksidipäästöjä, jolloin sähköyhtiö tarvitsee aiempaa vähemmän päästöoikeuksia. Ylimääräiset päästöoikeudet voidaan myydä hiilimarkkinoilla, jolloin muita päästövähennysprojekteja voidaan jättää toteuttamatta. Näin tuulivoiman aiheuttama päästövähennys luo lisäpäästöjä toisaalla. RGGI-järjestelmään suunniteltu mekanismi luo kuluttajalle mahdollisuuden mitätöidä päästöoikeuksia uusiutuvan energian käytöstä syntyneiden päästövähennysten verran. Päästöoikeudet vähennetään osavaltion päästöbudjetista. (RGGI 2007a.)

Kustannuksia hillitsevinä ominaisuuksina RGGI-järjestelmässä sallitaan päästöoikeuksien tallettaminen. Samoin ennen järjestelmän toimikautta toteutettujen päästövähennysten hyväksi lukeminen on mahdollista. Järjestelmään sisältyy myös varaventiilimekanismeja, jotka lähinnä lisäävät vain krediittien käyttöosuutta. (RGGI 2007a.) Huomionarvoista on, että nämä mekanismit eivät lisää varsinaista päästökattoa.

Päästöjen mittauksessa sovelletaan Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviranomaisen EPA:n (Environmental Protection Agency) laatimia standardeja

⁵⁰ Laskettu UNFCCC:n (2007) luvuista.

(RGGI 2007b). Tässä yhteydessä ei tarkastella näiden standardien yhteensopivuutta UNFCCC:n MRV-järjestelmiin.

RGGI:n yhteyteen rakennettava krediittijärjestelmä mahdollistaa päästövähennysprojektien tuottamisen myös päästökaupan ulkopuolisilla sektoreilla. Rakenteeltaan krediittijärjestelmä on samankaltainen kuin CDM-järjestelmä. Päästökauppajärjestelmään osallistuvien yritysten on sallittu käyttää krediittejä enintään 3,3 % – 10 % päästöoikeuksien kokonaismäärästä. (RGGI 2007a, 9.)

A.1.2 Linkittyminen RGGI:n ja EU ETS:n välillä

Rakenteeltaan ja toimintaperiaatteiltaan RGGI-järjestelmä on suunniteltu siten, että se on mahdollista linkittää EU ETS-järjestelmään. Linkittymiselle ei löydy merkittäviä teknisiä esteitä.

RGGI:n varaventiilimekanismi ei muodosta merkittävää ongelmaa, kuten varaventiilit yleensä. RGGI:n varaventiili muuttaa krediittien käytön määrää, mutta ei lisää päästöoikeuksien kokonaismäärää. Varaventiilin käyttö ei siis muuta toteutuneita päästöjä, eikä se luo järjestelmän uutta varallisuutta tyhjästä.

Myöskään järjestelmän poikkeuksellinen päästöoikeuksien mitätöimiskäytäntö ei ole ongelma. Kun uusiutuvan energian käytön myötä päästöoikeuksia mitätöidään, kokonaisuuden päästökatto tiukkenee. Taloudellisesta näkökulmasta päästöoikeuksien mitätöinti on järjestelmän ylläpitäjän rahoittama lisäkannustin.

On kuitenkin syytä olettaa, että linkittyminen RGGI:n kanssa ei ole kovin todennäköistä. Ensinnäkin järjestelmä on kooltaan vain 10 % suhteessa EU ETS:n eli se on verrattain pieni. Kattavuudeltaan se on eurooppalaista järjestelmää suppeampi: RGGI kattaa vain sähköntuottajat, muttei suuria sähkön kuluttajia. Vaikkei järjestelmien alueilla olekaan yhteisiä sähkömarkkinoita, tästä huolimatta sähkön hinnan yhdenmukaistuminen heikentäisi kilpailun vääristymiä sähkön käyttäjien osalta. Joka tapauksessa linkittymisen vaikutus eurooppalaisen ilmastopolitiikan kokonaiskustannuksiin olisi lievä.

Toiseksi linkittymisen merkittävin ongelma lienee poliittinen. RGGI on

tavoitteiltaan huomattavasti löysempi kuin EU ETS. Tämä näkyy RGGI:n päästöoikeuksien hinnassa, jotka oli viimeisimmässä päästöoikeushuutokaupassa (18.3.2009) vuoden 2009 päästöoikeuden hinta oli 3,51 dollaria (RGGI 2009). Vuoden 2009 EUA-päästöoikeuksien oli 24.4.2009 Nord Pool -pörssissä 13,75 euroa (Nord Pool 2009).⁵¹

Suuren hintaeron johdosta linkittyminen muodostaisi merkittävän pääomavirran RGGI:n alueelle, kun eurooppalaiset yritykset hankkisivat amerikkalaisia päästöoikeuksia korvatakseen kalliit EUA-päästöoikeudet. Ensimmäisestään RGGI:n ylläpitäjät hyötyvät hinnannousun aikaansaamasta arvonnoususta, koska RGGI jakaa päästöoikeudet pääasiassa huutokauppaamalla. Vastavuoroisesti EU:n ilmastopolitiikan kokonaiskustannukset pienenevät.

Yritysten kannalta päästövähennysten tuottamisen kannattavuus lisääntyy Yhdysvalloissa ja heikkenisi Euroopassa. Linkki pienentäisi ilmastopolitiikan aiheuttamia kustannuksia eurooppalaisten yritysten osalta ja lisääisi kustannuksia merkittävästi yhdysvaltalaisen yritysten osalta.

Vaikka suuri hinnanmuutos implikoi suurta kustannusten säästöpotentiaalia, muuttaisi hinnanmuutos radikaalisti linkittymisen osapuolien ilmastostrategiaa. EU ETS:n päästöoikeuksien hinta on nostettu korkealle tarkoituksena kannustaa muun muassa puhtaamman teknologian kehittämiseen. Puolestaan RGGI:n osalta linkki muuttaisi amerikkalaisen ilmastopolitiikan tiukkuutta merkittävästi.

RGGI:n löysät tavoitteet saattavat aiheuttaa ongelman myös kokonaispäästöille. Linkittyminen saattaisi lisätä päästöjä, sillä on mahdollista, että RGGI:n päästökatto ylittää todelliset päästöt.

Kolmas linkittymisen este seuraa siitä, että Yhdysvallat ei ole Kioton pöytäkirjan jäsen. Tosin tämä ongelma saattaa poistua Kioto-kauden jälkeen, jos Yhdysvallat osallistuu yhteiseen ilmastopöytäkirjaan, jossa sovitaan kansainvälisestä päästökaupasta. Käytännön tasolla saattaisi syntyä seuraavanlainen ongelma: Linkin välityksellä päästövähennysten tuotantoa siirtyy Euroopasta Yhdysvaltoihin, joten Euroopan unionin alueella tuotettujen päästöjen

⁵¹ RGGI:n päästöoikeus sallii tuottaa yhden lyhyen tonnin (noin 907 kg) hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi MRV-järjestelmät ovat erilaiset, joten hinnat eivät ole täysin verrannollisia.

määrä kasvaa ja mahdollisesti ylittää Kioton pöytäkirjan päästötavoitteen. Koska pöytäkirja ei tunnista Yhdysvaltain alueella aiheutunutta päästöjen vähennystä, EU joutuu hankkimaan lisää Kioton päästöyksiköitä tai toteuttamaan uusia päästövähennyksiä kattaakseen lisääntyneet päästöt. Vaikka linkki ei vaikuttaisikaan päästöjen kokonaismäärään, niin Kioton pöytäkirjan puitteissa päästöt näyttävät lisääntyneen.

Vaikka RGGI ei nykyisellään olekaan kovin houkutteleva linkittymiskumppani, pidemmällä aikavälillä sen merkitys saattaa olla toisenlainen. Toiminnallisesti ja teknisesti RGGI-järjestelmän rakenne on linkittymisen kannalta varsin sovelias; linkittymisen ongelmat liittyvät lähinnä järjestelmän poliittiseen ympäristöön. Poliittiset esteet saattavat poistua lähitulevaisuudessa, jos järjestelmän tavoitteita tiukennetaan uuden ilmastopimuksen yhteydessä. Toisaalta alueellinen RGGI-järjestelmä saattaa toimia mallina ja oppikokemuksena Yhdysvaltain kansallisen päästökauppajärjestelmän suunnittelussa.

A.2 Western Climate Initiative

A.2.1 WCI-järjestelmä

Western Climate Initiative eli WCI on eräiden Yhdysvaltain, Kanadan ja Meksikon osavaltioiden ja provinssien vuonna 2007 käynnistetty yhteishanke, jonka tavoitteena muun muassa on suunnitella ja perustaa alueellinen yritystason päästökauppajärjestelmä. Päästökauppajärjestelmän on määrä aloittaa toimintansa vuonna 2012 (WCI 2008a).

Vuonna 2008 julkaistu *Draft Design Recommendations on Elements of the Cap-and-Trade Program* -luonnosasiakirja esittelee kiintiöjärjestelmään suunniteltuja elementtejä, vaikkakin suunnitelmat ovat monelta osin vielä avoimna (WCI 2008b).

WCI:n osakkaat ovat asettaneet tavoitteekseen vähentää 15 % vuoden 2005 kokonaispäästöistään vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi osakkaat tunnistavat tarpeen vähentää päästöjä huomattavasti enemmän pitkällä aikavälillä. (WCI 2008b, 2.) Alueen yhteenlasketut kasvihuonekaasupäästöt ovat noin miljardi hiiliekvivalenttitonnia, joten linkittyminen WCI:n kanssa saattaisi

tuoda merkittäviä kustannussäästöjä.

Luonnosasiakirja suosittelee, että WCI kattaisi kaikki kuusi kasvihuonekaasua. Sektorien osalta ehdotetaan, että mukana olisivat sähköntuotantolaitokset, kauppa- ja teollisuusalojen suuret tuottajat, jätehuolto, liikenne ja kotitalouksien käyttämät fossiiliset polttoaineet. Pakollisen osallistumisen kynnysarvo ehdotetaan asetettavaksi siten, että järjestelmä kattaa 90 % kasvihuonekaasupäästöistä, jotka aiheutuvat muusta kuin sähköntuotannosta. Sähköntuotannon osalta kattavuus jää avoimeksi. Asiakirja ehdottaa, että myös muiden sektorien liittäminen tehdään mahdolliseksi. (WCI 2008b, 8–10.)

Päästöoikeuksien alkujaon suhteen WCI soveltaa huutokaupan ja ilmaisa-jaon yhdistelmää. Järjestelmän alkuvaiheessa osavaltioille ja provinsseille sallitaan päättää vapaammin alkujaosta. Myöhemmin alkujakoa pyritään harmonisoimaan. Alueiden päästökatto on absoluuttinen ja se tiukkenee vaiheittain. (WCI 2008b, 13–15.)

Luonnosasiakirja ehdottaa, että WCI:n osapuolille sallitaan mahdollisuus myöntää päästöyksiköitä päästövähennysprojekteista, jotka on toteutettu ennen järjestelmän alkua-jankohtaa. Myönnetyt päästöyksiköt vähennetään osapuolen päästöoikeusbudjetista, joten ne eivät lisää kokonaispäästöjä. Päästöoikeuksien tallettamista suositellaan, mutta lainaamista ei. Päästökaupan tilikauden pituudeksi ehdotetaan kolmea vuotta, kuten RGGI:ssä. (WCI 2008b, 16.)

A.2.2 WCI:n ja EU ETS:n linkittäminen

Taloudellisesta näkökulmasta WCI:n ja EU ETS:n linkittäminen laajentaisi eurooppalaisia hiilimarkkinoita merkittävästi. Riippuen WCI-järjestelmän lopullisesta kattavuudesta linkki laajentaisi EU ETS:n päästömarkkinoita yli kolmanneksella.

Yleisesti ottaen luonnosasiakirjassa hahmoteltu WCI-järjestelmän rakenne viittaa siihen, että sen suunnittelussa on otettu linkittyminen huomioon, vaikkei linkittymistä luonnoksessa ehdotetakaan. Luonnosasiakirjan kommentojien esityksistä huolimatta, asiakirja ei suosittele esimerkiksi hintakattoja

tai muita varaventtiilimekanismeja (WCI 2008b, 17–18). Luonnoksen ehdottama järjestelmä ei sisällä rakenteellisia tekijöitä, jotka muodostaisivat ongelmia linkittymiselle.

Kuten RGGI:n tapauksessa merkittävin linkittymisen esteet ovat luonteeltaan poliittisia. Ensinnäkin WCI:n tavoite on linkittymisen kannalta liian löysä. Laskettaessa Yhdysvaltojen kokonaispäästöjen perusteella, WCI:n tavoite vähentää päästöjä noin prosentin verrattuna vuoden 1990 lukuihin.⁵² On siis oletettavaa, että WCI:n päästöoikeudet tulevat olemaan halvempia EU ETS:iin verrattuna. Tämä aiheuttaisi WCI:n alueelle valtavan pääomavirran.

Toiseksi Yhdysvallat ei ole Kioton pöytäkirjan jäsen. Kuten RGGI:n tapauksessa, linkin seurauksena päästöjen näennäinen lisääntyminen aiheuttaisi lisäkustannuksia Euroopassa. Lyhyellä tähtäimellä linkittäminen vaatisi poikkeusjärjestelyjä Kioton pöytäkirjan puitteissa.

A.3 Australia

A.3.1 CPRS-järjestelmä

Australiassa on suunnitteilla uusi kansallinen yritystason kiintiöjärjestelmä Carbon Pollution Reduction Scheme (lyhyemmin CPRS).⁵³ Sen on määrä astua voimaan vuonna 2010. On nähtävissä, että järjestelmän mallina on käytetty pitkälti EU:n päästökauppajärjestelmää, mutta myös amerikkalaiset järjestelmät on otettu huomioon. Australian ilmastopolitiikan tavoitteena vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 5 % – 15 % vuoden 2000 tasolta vuoteen 2020 mennessä riippuen muiden maiden toimenpiteistä ja 60 % suhteessa nykyiseen kehitysuriaan vuoteen 2050 mennessä. (DCC 2008b.)

Australian Ilmastonmuutosministeriön (Department of Climate Change, DCC) keskustelupapereissa (DCC 2008a; DCC 2008c) käsitellään erityisesti CPRS:n linkittymismahdollisuuksia.

⁵² Arvioitu UNFCCC:n (2007) luvuista.

⁵³ Aiemmin hankkeesta on käytetty nimeä Australian Emissions Trading Scheme (AETS).

Vuonna 2005 Australia tuotti noin 525 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttia tonnia kasvihuonekaasupäästöjä (UNFCCC 2007). Tämä vastaa noin neljännessä Euroopan Yhteisön alueella tuotetuista päästöistä. Riippuen CPRS-järjestelmän lopullisesta kattavuudesta linkittäminen EU ETS:n kanssa laajentaisi hiilimarkkinoita merkittävästi.

DCC:n keskustelupaperi (2008c) mainostaa CPRS:ä maailman kattavimmaksi päästökauppajärjestelmäksi. Ehdotettu järjestelmä kattaisi kaikki kuusi Kioton pöytäkirjan määrittelemää kasvihuonekaasua. Sektoreista mukana olisi energian tuotanto, liikenne, teollinen tuotanto, jätteenkäsittely, metsähoito ja fossiilisten polttoaineiden tuotantoon liittyvät päästöt (fugitive emissions). Myös maatalouden päästöjen liittämistä järjestelmään harkitaan. Vielä tässä vaiheessa DCC ei aio ehdottaa oman krediittijärjestelmän muodostamista. (DCC 2008c, 15–21.)

Alkujaon suhteen ehdotetaan sovellettavaksi pääasiassa huutokauppaa. Huutokaupasta saatujen tulojen avulla pyritään auttamaan kotitalouksia ja yrityksiä sopeutumaan järjestelmään. Pitkällä tähtäimellä on tarkoitus siirtyä kokonaan huutokauppaan. (DCC 2008c, 20.)

Päästöoikeuksien tallettaminen aiotaan sallia rajoituksetta. Päästöoikeuksien lainaaminen sallitaan, mutta rajoitetusti. Keskustelupaperi ehdottaa, että lainaosuuden ylärajaksi asetetaan 5 % tai vähemmän. (DCC 2008c, 162–168.)

Keskustelupaperi ehdottaa, että järjestelmään rakennettaisiin hintakatto, joka alustavasti olisi käytössä vuoteen 2015 saakka. Kynnyshintaa ei vielä esitetä, mutta se aiotaan asettaa siten, että kynnyсарvon ylittyminen on hyvin epätodennäköistä. Hintakaton tarpeellisuutta pyritään arvioimaan järjestelmän ensimmäisen arviointikierroksen yhteydessä. (DCC 2008c, 181–188.)

Kansainvälinen linkittyminen on huomioitu hyvin CPRS-järjestelmän suunnittelussa, erityisesti Kioton krediittijärjestelmien osalta. Alkuvaiheessa CER, ERU ja RMU-krediittien rajoitettu käyttö sallitaan. Käyttörajoituksen suuruutta ei vielä ole määritetty. Linkittymistä Kioton pöytäkirjan ulkopuolisiin järjestelmiin ei suositella. (DCC 2008c, 221–253.)

DCC:n ehdottaa, että CPRS:n päästöoikeuksien vientiä muihin järjestelmiin ei sallita. Käytännössä tällaisen kaupanesteen ylläpitäminen edellyttäisi,

että toiset päästökauppajärjestelmät pidättäytyisivät hyväksymästä CPRS:n päästöoikeuksia. Keskustelupaperi toteaaakin, että käytännössä tällaisen esteen luominen on äärimmäisen vaikeata. (DCC 2008c, 244.)

A.3.2 CPRS:n ja EU ETS:n linkittäminen

Taloudellisesta näkökulmasta CPRS:n ja EU ETS:n linkittäminen laajentaisi eurooppalaisia hiilimarkkinoita merkittävästi, sillä toteutuessaan suunnitelmien mukaisesti linkki laajentaisi EU:n hiilimarkkinoita noin neljänneksellä. Kattavuudeltaan CPRS on laajempi kuin EU ETS. Tämä saattaisi synnyttää kilpailukyvn vääristymiä, jotka toimisivat eurooppalaisten yritysten eduksi. Oletettavasti tämä loisi paineita eurooppalaisen järjestelmän kattavuuden parantamiselle. Taloudellisesta näkökulmasta CPRS-järjestelmää on syytä pitää varteenotettavana linkittymiskumppanina EU ETS:n kannalta.

Teknisessä katsannossa ainoa merkittävän ongelman linkittymiselle muodostaa CPRS:n mahdollinen hintakatto eli varaventiilimekanismi. Tässä tapauksessa ongelma on hieman poikkeuksellinen, sillä Australia on hyvin todennäköisesti Post-Kioto-sopimuksen jäsen. Onkin syytä tarkastella hieman tarkemmin, mitä tapahtuisi, jos hintakaton kynnys ylittyi:

Hintakaton astuessa voimaan markkinoille virtaa uusia päästöoikeuksia, jotka mahdollistavat päästöjen lisääntymisen. Post-Kioto-velvoitteiden johdosta Australian valtio joutuisi joko toteuttamaan päästövähennyksiä päästökaupan ulkopuolella tai ostamaan krediittejä ulkomailta. Koska päästökauppajärjestelmä kattaa lähes kaikki maan kasvihuonekaasupäästöt, käytännössä vain jälkimmäinen vaihtoehto on mahdollinen. Australian valtio joutuu siis hankkimaan markkinoilta Kioto-yksiköitä; se ei voi luoda päästöoikeuksia tyhjästä. Australia tarvitsee Kioto-yksiköitä määrän, joka vastaa varaventiilin synnyttämiä päästöoikeuksia. Käytännössä tämä tarkoittaa, että hallitus joutuu rahoittamaan varaventiilin budjetistaan. Lopputuloksena varaventiili vääristää kilpailukykyä, mutta ei johda vastikkeettomaan pääomavirtaan. Ongelma on siis luonteeltaan kauppapoliittinen.

Erityisesti ongelma korostuu Australian valtion osalta. Oletetaan, että CPRS olisi rajoituksetta osana linkittyneitä kansainvälisiä hiilimarkkinoita.

Jos kansainvälinen markkinahinta ylittää CPRS:n hintakaton, varaventiili astuu voimaan. Valtio joutuu ostamaan päästöyksiköitä kalliimpaan markkinahintaan, ja tarjoamaan niitä hintakaton hinnalla australialaisille yrityksille. Nyt australialaiset yritysten on mahdollista ostaa päästöoikeuksia halvalla ja myydä niitä kalliimpaan markkinahintaan. Näin päästökaupan yritykset voivat kerätä Australian valtion rahoittamia arbitraasituloja niin kauan kuin markkinahinta ylittää hintakaton.

Australian kannalta onkin mahdotonta linkittyä muihin kiintiöjärjestelmiin, jos hintakatto on voimassa.

Muilta osin järjestelmien tekninen yhteensopivuus on hyvä. Australian suunnitelmana on tehdä CPRS:n päästöoikeuksista erillisiä Kioto-yksiköitä, jolloin mittaus-, raportointi- ja todennusjärjestelmät luodaan yhteensopiviksi muiden UNFCCC:n osapuolien päästökauppajärjestelmien kanssa.

Lyhyellä tähtäimellä linkittyminen jäänee toteutumatta. CPRS:n strategiana onkin saada omat hiilimarkkinansa toimimaan vakaasti ennen kuin se linkittyy muihin paikallisiin kiintiöjärjestelmiin (DCC 2008c, 20).

A.4 Uusi-Seelanti

A.4.1 NZ ETS

Uuden-Seelannin kansallinen yritystason päästökauppajärjestelmä (New Zealand Emissions Trading Scheme, NZ ETS) aloitti toimintansa vuoden 2008 alussa. Päästökauppajärjestelmän rakennetta, toimintaperiaatteita ja kehityslinjoja käsitellään Uuden-Seelannin hallituksen asiakirjassa *The Framework for a New Zealand Emissions Trading Scheme*. (NZ 2007a.)

Tavoitteensa NZ ETS määrittää Kioton pöytäkirjan mukaisesti. Kioto-kaudella päästöt pyritään siis sovittamaan pöytäkirjan tavoitteisiin. Kioto-kauden jälkeen päästökatto sovitetaan seuraavan kansainvälisen ilmastosopimuksen mukaiseksi. (NZ 2007a.)

NZ ETS:n kattavuus lisääntyy vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa mukana on vain metsänhoitoala (vuodesta 2008 alkaen), mutta myöhemmin päästökauppa laajenee muillekin sektoreille. Vuoden 2010 alusta myös säh-

köntuotanto ja suuret energian kuluttajat osallistuvat päästökauppaan. Liikennesektori liittyy mukaa vuonna 2011, maatalous ja jätehuolto vuonna 2013.⁵⁴ Järjestelmä seuraa kaikkia kuutta Kioton pöytäkirjan määrittelemää kasvihuonekaasua. (NZ 2007b)

Päästöoikeuksien alkujaon osalta NZ ETS soveltaa huutokaupan ja ilmaisa-jaon yhdistelmää. Alkujaossa huomioidaan erityisesti toimialan kyky siirtää päästöoikeuksien kustannus kuluttajahintoihin. (NZ 2007b) Järjestelmä ei sisällä varsinaisia varaventiilimekanismeja. Velvoitteiden noudattamatta jättämisestä seuraa sakkorangaistus, minkä lisäksi toimija joutuu luovuttamaan vajausta vastaavan määrän päästöoikeuksia. (NZ 2007a, 55.) Päästökauppajärjestelmänä suunnitellaan liitettäväksi myös paikallinen krediittijärjestelmä, jonka avulla luodaan kannustimia päästövähennyksille päästökaupan sektorien ulkopuolella (NZ 2007b).

A.4.2 NZ ETS:n linkittäminen

NZ ETS on pieni kiintiöjärjestelmä, joka tunnistaa hyvin tarpeensa linkittyä muihin päästökauppajärjestelmiin. Yhtäältä NZ ETS sallii Kioto-yksiköiden käyttämisen. Toisaalta suunnitteilla on myös kaksisuuntaisia linkkejä yritystason kiintiöjärjestelmiin. (NZ 2007a, 42–43).

Uuden-Seelannin hallituksen päästökauppajärjestelmää käsittelevä asiakirja toteaa, että lyhyellä tähtäimellä linkittymistä EU ETS:iin pidetään varteenotettavana. Ongelmia saattaisi aiheuttaa EU:n aikomus liittää päästökauppajärjestelmään lentoliikenteen päästöt, jotka eivät ole osana UNFCCC:n sopimuskehikkoa. (NZ 2007a, 42–43.) Lisäksi linkittymistä rakenteilla olevaan Australian kansalliseen päästökauppajärjestelmään on kaavailtu molemmin puolin.⁵⁵

EU:n näkökulmasta linkittymien NZ ETS:iin ei tarjoa merkittävää kustannussäästöpotentiaalia. Uuden-Seelannin hiilidioksidiekvivalentit päästöt

⁵⁴ Alkuperäisessä suunnitelmassa liikennesektorin oli määrä liittyä päästökauppaan jo vuonna 2009, mutta ajankohtaa lykättiin (ks. <http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/emissions-trading-bulletin-7/emissions-trading-bulletin-7.pdf>).

⁵⁵ Ks. Point Carbon -uutispalvelu: Wide interest in Australia-New Zealand carbon trading link, 8.5.2008, ja Australia hints at prospect of linking with New Zealand trading scheme, 9.5.2008.

ovat kokonaisuudessaan vain noin 77 miljoonaa tonnia⁵⁶, mikä on alle prosentti EU-alueen kokonaispäästöistä. Vaikka NZ ETS:tä muodostunee EU ETS:ä kattavampi sektorien ja kasvihuonekaasujen osalta, niin NZ ETS:n osuus hiilimarkkinoiden kokonaisuudesta olisi parhaimmillaankin vain prosentin luokkaa. Tämän johdosta onkin syytä asettaa tiukat kriteerit järjestelmien yhteensopivuudelle.

Teknisesti linkittymiselle ei pitäisi olla esteitä. Järjestelmät ovat toimintaperiaatteiltaan hyvin samankaltaisia. NZ ETS:n suunnittelussa on huomioitu linkittämisen mahdollisuus ja järjestelmän rakenne pyritään pitämään yhteensopivana muihin päästökauppajärjestelmiin. Esimerkiksi varaventtiilimekanismeja ei suunnitella käytettäväksi ainakaan pitkällä tähtäimellä, vaikkakin niiden käytölle varataan mahdollisuus tietyissä olosuhteissa. (NZ 2007a, 42–47.)

EU:n kannalta ongelman aiheuttanee se, että NZ ETS hyväksyy oman NZU-päästöoikeuden lisäksi Kioton pöytäkirjan AAU-, CER- ja ERU-päästöyksiköiden rajoittamattoman käytön.⁵⁷ NZ ETS muodostaa siis rajoittamattoman yksisuuntaisen linkin Kioto-järjestelmiin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että Kioto-yksiköiden markkinahinnat määrittävät suurelta osin NZU-päästöoikeuksien hinnan. NZU olisi siis hieman halvempi kuin EU ETS:n EUA-päästöoikeus.

Jos järjestelmän linkitettäisiin eli EU ETS sallisi yritystensä käyttää NZU-päästöoikeuksia rajatta, niin oletettavasti hinta- ja kokoeron seurauksena eurooppalaiset yritykset ostaisivat NZU-päästöoikeudet pois markkinoilta. Koska NZU-päästöyksiköiden tarjonnan määrä on vain noin prosentti EUA:n tarjonnasta, käytännössä NZU-yksiköiden käyttö eurooppalaisilla yrityksillä rajoittuisi noin prosenttiin. Puolestaan uusseelantilaiset yritykset hankkisivat päästöoikeutensa Kioto-yksiköiden markkinoilta eli ne käyttäisivät vain AAU-, CER- ja ERU-päästöyksiköitä.

Talous- ja ympäristövaikutusten osalta linkittymisen aiheuttama vaikutus on lähestulkoon sama kuin, jos EU ETS lisäisi Kioto-yksiköiden sallittua

⁵⁶ Antropogeeniset hiilidioksidiekvivalentit päästöt vuonna 2005, kun maankäyttöä, sen muutosta tai metsänhoitoa ei huomioida (UNFCCC 2007).

⁵⁷ Tosin ydinvoimaan liittyviä CER- ja ERU-krediittejä ei hyväksytä.

käyttöosuutta prosenttiyksiköllä – sillä erotuksella, että NZU-yksiköistä jouduttaisiin maksamaan hieman korkeampi hinta kuin Kioto-yksiköistä. Toisin sanoen NZ ETS toimisi vain eräänlaisena välikätenä, joka vaihtaa Kioto-yksiköt NZU-päästöoikeuksiin ja myy ne EU ETS:iin kalliimmalla hinnalla.

Vuoden 2012 jälkeen uuden kansainvälisen ilmastopöimuksen vallitessa kansainvälisten päästöyksiköiden (kuten Kioto-yksiköiden) rajoittamista pidetään mahdollisena (NZ 2007a, 47).

Liite B

Todistuksia

Lause 1. Olkoon $\omega > 0$ ja funktio $\epsilon: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ jatkuva ja vähenevä. Olkoon lisäksi $\lim_{p \rightarrow 0+} \epsilon(p) = \infty$ ja $\lim_{p \rightarrow \infty} \epsilon(p) = 0$.

1. Jos $p_0 > 0$ ja $\omega - \epsilon(p_0) > 0$, niin on olemassa $p_1 < p_0$, jolla $\omega - \epsilon(p_1) = 0$ ja $p_2 < p_1$, jolle $\omega - \epsilon(p_2) < 0$.
2. Jos $p_0 > 0$ ja $\omega - \epsilon(p_0) < 0$, niin on olemassa $p_1 > p_0$, jolla $\omega - \epsilon(p_1) = 0$ ja $p_2 > p_1$, jolle $\omega - \epsilon(p_2) > 0$.

Todistus. Kohta 1: Olkoon $\omega, p_0 > 0$ ja $\omega - \epsilon(p_0) > 0$. Koska $\lim_{p \rightarrow 0+} \epsilon(p) = \infty$, niin kaikille $M > 0$ on olemassa $\delta > 0$, jolle $\epsilon(p) > M$, kun $0 < p < \delta$. Kun $\omega > 0$, niin on olemassa $\delta > 0$, jolle $\epsilon(p_2) > \omega$, kun $0 < p_2 < \delta$. Koska funktio ϵ on vähenevä ja $\epsilon(p_2) > \omega > \epsilon(p_0)$, niin $p_2 < \delta < p_0$. Nyt erotus $\omega - \epsilon(p_2) < \omega - \omega = 0$, kun $0 < p_2 < \delta$. Koska funktio ϵ on jatkuva, Bolzanon lauseen nojalla on olemassa piste $p_1 \in]p_2, p_0[$, jolla $\epsilon(p_1) = \omega$ ja $\omega - \epsilon(p_1) = \omega - \omega = 0$. Kohta 2 voidaan todistaa vastaavasti. \square

Lause 2. Jos ehdot (3.9) pätevät, niin yhtälöryhmä (4.7) antaa yksikäsitteisen ratkaisun.

Todistus. Olkoon funktio f_i sellainen, että ehdot (3.9) pätevät kaikilla i . Koska $\frac{\partial f_i}{\partial x_i} > 0$, epäyhtälöstä (4.7a) seuraa, että $\gamma_i^* > 0$. Nyt epäyhtälöstä (4.7c) nähdään, että $x_i^* = x_i^s$ kaikilla i .

Olkoon

$$M = \max \left\{ \inf p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \mathbb{R}_+) \mid i = 1, \dots, \bar{i} \right\},$$

jossa $p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \mathbb{R}_+) = \left\{ p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \epsilon_i^*) \mid \epsilon_i^* \in \mathbb{R}_+ \right\}$ on kuvajoukko. Nyt kaikilla $p^\epsilon > M$ ja i on olemassa $\epsilon_i^* \geq 0$, joilla ehdot (4.7b) pätevät.⁵⁸ Lisäksi epäyhtälöiden (4.7b) avulla voidaan määritellä implisiittifunktio $\epsilon_i^*:]M, \infty] \rightarrow [0, \infty]$, jolla $\epsilon_i^* = \epsilon_i^*(p^\epsilon)$.

Jos epäyhtälössä (4.7b) luku $\epsilon_i^* > 0$, niin epäyhtälö on sitova. Nyt ottamalla kokonaisdifferentiaali puolittain yhtälöstä $p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i} - p^\epsilon = 0$ saadaan $p^y \frac{\partial^2 f_i}{\partial \epsilon_i^2} d\epsilon_i^* - dp^\epsilon = 0$, joka voidaan järjestää siten, että

$$\frac{d\epsilon_i^*}{dp^\epsilon} = \left(\frac{\partial^2 f_i}{\partial \epsilon_i^2} \right)^{-1} < 0.$$

Näin saatu päästöoikeuksien kokonaiskysyntäfunktio ϵ_i^* on aidosti vähenevä kaikilla i . Lisäksi $\epsilon_i^* \rightarrow 0$, kun $p^\epsilon \rightarrow \infty$, ja $\epsilon_i^* \rightarrow \infty$, kun $p^\epsilon \rightarrow M$. Nyt bijektioiden summa $\sum_i \epsilon_i^*$ on bijektio joukossa $[M, \infty]$, joten on olemassa yksikäsitteinen p^ϵ , joka toteuttaa yhtälöryhmän (4.7). \square

⁵⁸ Huomaa, että jos $p \leq M$, niin on olemassa i siten, että kaikilla $\epsilon_i^* \geq 0$ pätee $p^y \frac{\partial f_i}{\partial \epsilon_i}(x_i^s, \epsilon_i^*) > p$.

Liite C

Linkittymismallin merkinnät

Muuttuja	Merkitys
$y_i \in \mathbb{R}$	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ kokonaistuotanto.
$y_{ij} \in \mathbb{R}$	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ yrityksen $j = 1, \dots, \bar{j}$ tuotanto.
$x_i \in \mathbb{R}$	Järjestelmän i kokonaispanos.
$x_{ij} \in \mathbb{R}$	Järjestelmän i yrityksen j panos.
$\epsilon_i \in \mathbb{R}$	Järjestelmän i kokonaispäästöt.
$\epsilon_{ij} \in \mathbb{R}$	Järjestelmän i yrityksen j päästöt.
f_i	Järjestelmän i kokonaistuotantofunktio, $(x_i, \epsilon_i) \mapsto f_i(x_i, \epsilon_i)$.
f_{ij}	Järjestelmän i yrityksen j tuotantofunktio, $(x_{ij}, \epsilon_{ij}) \mapsto f_{ij}(x_{ij}, \epsilon_{ij})$.
ω_{ij}	Järjestelmän i yrityksen j saama ilmaisjako.
ω_i	Järjestelmän i ilmaisjaon summa, $\omega_i = \sum_{j=1}^{\bar{j}} \omega_{ij}$.
K_i^h	Kiintiöjärjestelmän i huutokaupattujen päästöoikeuksien määrä.
K_i	Kiintiöjärjestelmän i päästökatto, $K_i = \omega_i + K_i^h$.
$\hat{\epsilon}_k$	Järjestelmän k BAU-skenaarion mukaiset kokonaispäästöt.

Muuttuja	Merkitys
$\hat{\epsilon}_{kj}$	Järjestelmän k yrityksen tai hankkeen j BAU-skenaarion mukaiset päästöt.
r_{kj}	Järjestelmän k yrityksen tai hankkeen j päästövähennys. $r_{kj} = \hat{\epsilon}_{kj} - \epsilon_{kj}$.
c_k	Krediittijärjestelmän k krediittifunktio, jossa arvo $c_k(r)$ on päästövähennyksestä r saatujen krediittien määrä ja $k = 1, \dots, \bar{k}$.
p_{ij}^y	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ yrityksen $j = 1, \dots, \bar{j}$ tuotannon hinta.
p_i^y	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ kokonaistuotannon hinta, jossa $p_i^y = \sum_{j=1}^{\bar{j}} p_{ij}^y \frac{y_{ij}}{y_i}$.
p_i^x	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ panoshinta.
p_i^ϵ	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ päästöoikeuksien hinta.
\hat{p}_i^ϵ	Järjestelmän $i = 1, \dots, \bar{i}$ päästöjen aiheuttama yksityinen kustannus.

Lähteet

Anger, N. (2008), "Emissions trading beyond Europe: Linking schemes in a post-Kyoto world", *Energy Economics*, 30: 2028.

Baumol, W. J. ja Oates, W. E. (1975), *The Theory of Environmental Policy*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA.

Böhringer, C., Hoffmann, T., Lange, A., Loschel, A. ja Moslener, U. (2005), "Assessing emission regulation in Europe: An interactive simulation approach", *Energy Journal*, The, 26, 1.

Blyth, W. ja Bosi, M. (2004), *Linking Non-EU Domestic Emissions Trading Schemes With EU Emissions Trading Scheme*, International Energy Agency. Haettu 26.4.2009 osoitteesta: <http://www.oecd.org/dataoecd/38/7/32181382.pdf>.

Boyd, S. ja Vandenberghe, L. (2004), *Convex Optimization*, Cambridge University Press.

CCAP (2006), "Sector-based Approach to the Post-2012: Climate Change Policy Architecture", Center for Clean Air Policy. Haettu 26.4.2009 osoitteesta: http://www.ccap.org/docs/resources/68/Sector_Straw_Proposal-FINAL_for_FAD_Working_Paper.pdf.

Coase, R. H. (1960), "The Problem of Social Cost", *The Journal of Law and Economics*, 3: 1–44.

Crocker, T. D. (1966), *The Structuring of Atmospheric Pollution Control Systems*, New York: W.W. Norton. Ref. Hanley et al. (2006).

- Dales, J. H. (1968), *Pollution, Property and Prices*, University of Toronto Press, Toronto.
- DCC (2008a), *Agenda Paper: International Linking and the Australian Emissions Trading Scheme*, Australian Government, Department of Climate Change, Emissions Trading Stakeholders Roundtable. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.climatechange.gov.au/emissionstrading/consultation/pubs/ets-roundtable2-linking.pdf>.
- DCC (2008b), *Carbon Pollution Reduction Scheme: Australia's Low Pollution Future White Paper*, Australian Government, Department of Climate Change. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.climatechange.gov.au/whitepaper/index.html>.
- DCC (2008c), *Carbon Pollution Reduction Scheme: Green Paper*, Australian Government, Department of Climate Change. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.climatechange.gov.au/emissionstrading/consultation/pubs/ets-roundtable2-linking.pdf>.
- Egenhofer, C. ja Fujiwara, N. (2008), *Global Sectoral Industry Approaches to Climate Change: The Way Forward*, Centre for European Policy Studies (CEPS). Haettu 12.1.2009 osoitteesta: http://shop.ceps.be/downfree.php?item_id=1657.
- Ellis, J. ja Tirpak, D. (2006), *Linking GHG Emission Trading Systems and Markets*, Organisation for Economic Co-operation and Development. Haettu 7.1.2009 osoitteesta: <http://www.oecd.org/dataoecd/45/35/37672298.pdf>.
- Energiamarkkinavirasto (2009), *Energiamarkkinaviraston päästökauppaa käsittelevä internetsivusto*, <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/select.asp?gid=165> (viitattu 22.1.2009).
- EU (2004), "Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/101/EY, annettu 27 päivänä lokakuuta 2004, kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kaupan järjestelmän toteuttamisesta yhteisössä annetun direktiivin

2003/87/EY muuttamisesta Kioton pöytäkirjan hankemekanismien osalta.”, *Euroopan unionin virallinen lehti*, L 338, 0018 – 0023, 13.11.2004.

EU (2008), *Proposal for a Directive amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading system of the Community*, Euroopan unionin komissio. http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/pdf/com_2008_16_en.pdf.

Flachsland, C., Edenhofer, O., Jakob, M. ja Steckel, J. (2008), *Developing the International Carbon Market. Linking Options for the EU ETS*, Potsdam Institute for Climate Impact Research. <http://www.pik-potsdam.de/>.

Godby, R. (2002), ”Market Power in Laboratory Emission Permit Markets”, *Environmental & Resource Economics*, 23: 279–318.

Green, G. A. (2008), ”A quantitative analysis of the cost-effectiveness of project types in the CDM pipeline”, CD4CDM Working Papers, 4. Capacity Development for the Clean Development Mechanism, UNEP. Haettu 17.4.2009 osoitteesta: <http://www.cd4cdm.org/Publications/CostEffectivenessProjectsCDMPipeline.pdf>.

Hahn, R. W. (1984), ”Market Power and Transferable Property Rights”, *The Quarterly Journal of Economics*, 99: 753–65.

Haites, E. (2001), *Linking Domestic and Industry Greenhouse Gas Emission Trading Systems*, International Energy Agency. Haettu 7.1.2009 osoitteesta: <http://www.iea.org/textbase/papers/2001/epri.pdf>.

Haites, E. ja Wang, X. (2006), *Ensuring the Environmental Effectiveness of Linked Emissions Trading Schemes*, Margaree Consultants Inc, Toronto, Kanada. <http://www.margaree.ca/papers/Linking%20Trading%20Schemes-2006-05.pdf>.

Hanley, N., Shogren, J. F. ja White, B. (2007), *Environmental economics: in theory and practice* (2. p.), Palgrave Macmillan, New York, N.Y.

- IPCC (2007), *Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change: Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press.
- Jaffe, J. ja Stavins, R. (2007), *IETA Report on Linking GHG Emissions Trading Systems*, International Emissions Trading Association. <http://www.ieta.org/>.
- Mas-Colell, A., Whinston, M. D. ja Green, J. R. (1995), *Microeconomic Theory*, Oxford University Press.
- Montgomery, W. D. (1972), "Markets in licenses and efficient pollution control programs", *Journal of Economic Theory*, 5: 395–418.
- Nord Pool. (2009), *Weekly report Nord Pool carbon market - Week 15 - 2009*, Haettu 17.4.2009 osoitteesta: <http://www.nordpool.com/en/asa/Markets/Emissions/EUACER2/>.
- NZ (2007a), *The Framework for a New Zealand Emissions Trading Scheme*, New Zealand Government. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/framework-emissions-trading-scheme-sep07/framework-emissions-trading-scheme-sep07.pdf>.
- NZ (2007b), *New Zealands Climate Change Solutions: An overview*, New Zealand Government. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/climate-change-solutions-overview-sep07/climate-change-solutions-overview-sep07.pdf>.
- Rehdanz, K. ja Tol, R. S. J. (2005), "Unilateral regulation of bilateral trade in greenhouse gas emission permits", *Ecological Economics*, 54: 397–416.
- RGGI (2007a), *Overview of RGGI CO2 Budget Trading Program*, Regional Greenhouse Gas Initiative. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: http://www.rggi.org/docs/program_summary_10_07.pdf.

RGGI (2007b), "Regional Greenhouse Gas Initiative Model Rule", Regional Greenhouse Gas Initiative. Haettu 20.4.2009 osoitteesta http://www.rggi.org/docs/model_rule_corrected_1_5_07.pdf.

RGGI (2009), "States Release Results of Third Auction for RGGI CO2 Allowances", Regional Greenhouse Gas Initiative. Haettu 25.4.2009 osoitteesta: <http://www.rggi.org/docs/Auction%203%20News%20Release%20MM%20Report.pdf>.

Sterk, W., Braun, M., Haug, C., Korytarova, K. ja Scholten, A. (2006), "Ready to Link Up?: Implications of Design Differences for Linking Domestic Emissions Trading Schemes", Working Paper 1. Haettu 23.4.2009 osoitteesta http://www.wupperinst.org/en/info/entwd/uploads/tx_wibeitrag/ready-to-link-up.pdf.

Stern, N. (2008), *Key Elements of a Global Deal on Climate Change*, London School of Economics and Political Science. http://www.lse.ac.uk/collections/granthamInstitute/publications/KeyElementsOfAGlobalDeal_30Apr08.pdf.

Suomalainen, S. (2008), *Päästöoikeuksien alkujako EU:n päästökaupassa, Ilmaisjako vai huutokauppa*, Ympäristöministeriön raportteja 2.

TEM (2006), *Suomen esitys päästöoikeuksien kansalliseksi jakosuunnitelmaksi vuosille 2008–2012*, Työ- ja elinkeinoministeriö. http://www.tem.fi/files/16784/Jakosuunnitelmaesitys_29092006.pdf.

Tietenberg, T. (2006), *Emission trading, Principles and Practice*, RFF press, Washington, USA. Alunperin julkaistu vuonna 1985.

UNFCCC (2007), *National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2005*, UN Framework Convention on Climate Change, Subsidiary Body for Implementation. Haettu 20.4.2009 osoitteesta <http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbi/eng/30.pdf>.

- UNFCCC (2009), *Registry systems under the Kyoto Protocol*, UNFCCC:n internetsivut, http://unfccc.int/kyoto_protocol/registry_systems/items/2723.php (viitattu 22.1.2009).
- WB (2008), *State and Trends of the Carbon Market 2008*, World Bank Institute. <http://siteresources.worldbank.org/NEWS/Resources/State&Trendsformatted06May10pm.pdf>.
- WCI (2008a), *Draft Design of the Regional Cap-and-Trade Program*, Western Climate Initiative. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.westernclimateinitiative.org/ewebeditpro/items/0104F18808.PDF>.
- WCI (2008b), *Draft design Recommendations on Elements of the Cap-and-Trade Program*, Western Climate Initiative. Haettu 20.4.2009 osoitteesta: <http://www.westernclimateinitiative.org/ewebeditpro/items/0104F17390.PDF>.
- Wuppertal (2004), *The Introduction of Emissions Trading Systems as a Socio-Ecological Transformation Process*, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. http://www.wupperinst.org/en/projects/proj/index.html?&projekt_id=97&bid=43&searchart=projekt_uebersicht.

Ministry of Finance
Discussion Papers

- 1/2009 Mika Kuismanen – Ville Kämppi **The effects of fiscal policy on economic activity in Finland.** 2009. 26p
- 2/2009 Mikko Sariola **Monetary policy and exchange rate shocks: effects on foreign trade in Finland**
- 3/2009 Juha Itkonen **Päästökauppajärjestelmien linkittämisen ilmastopoliittiset vaikutukset**